

**О.В. Пышненко, Ю.А. Шиенок,  
А.А. Яхновец**

## **Ф и з и к а**

*Рабочая тетрадь  
для выполнения лабораторных работ  
по дисциплине «Физика» студентами  
биологического факультета  
заочной формы обучения*

2010

УДК 53(075.8)  
ББК 22.3я73  
П95

Авторы: доцент кафедры теоретической физики УО «ВГУ им. П.М. Машерова» **О.В. Пышненко**, преподаватель кафедры теоретической физики УО «ВГУ им. П.М. Машерова» **Ю.А. Шиенок**, старший преподаватель кафедры теоретической физики УО «ВГУ им. П.М. Машерова» **А.А. Яхновец**.

Рецензент:

доцент кафедры общей физики и астрономии УО «ВГУ им. П.М. Машерова»,  
кандидат педагогических наук *И.В. Галузо*

Рабочая тетрадь написана в соответствии с учебной программой по физике для специальности 1-33 01 01 «Биоэкология». Содержит теорию, методику выполнения, контрольные вопросы защиты лабораторных работ, материал для самостоятельной работы студентов, справочный материал и список литературы.

Учебное издание предназначено для изучения теоретического материала и отработки практических навыков при изучении дисциплины «Физика».

УДК 53(075.8)  
ББК 22.3я73

© Пышненко О.В., Шиенок Ю.А., А.А. Яхновец, 2010  
© УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2010

## Содержание

Сводная таблица учета выполнения и защиты лабораторных работ.....	4
Инструкция №19 по охране труда для студентов, занимающихся в лабораториях физического факультета.....	5
Методы вычисления погрешностей.....	8
<b>Раздел №1. Лабораторные работы.....</b>	<b>10</b>
Л/р №1. Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда.....	10
Л/р №2. Проверка закона сохранения механической энергии.....	18
Л/р №3. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса...	23
Л/р №4. Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца .....	27
Л/р №5. Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов.....	33
Л/р №6. Изучение электроизмерительных приборов. Проверка закона Ома для участка цепи.....	37
Л/р №7. Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току.....	46
Л/р №8. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Изучение принципа суперпозиции магнитных полей.....	50
Л/р №9. Определение фокусных расстояний и оптической силы линз.....	55
Л/р №10. Определение концентрации растворов с помощью рефрактометра.....	60
<b>Раздел №2. Теоретические материалы для самостоятельной контролируемой работы студентов по дисциплине «Физика».....</b>	<b>64</b>
№1. Биомеханические процессы в опорно-двигательном аппарате человека и животных. Механические свойства тканей организма.....	64
№2. Природа звука. Физические основы биологической акустики.....	66
№3. Движение крови в сосудистой системе. Работа сердца.....	72
№4. Капиллярные явления. Формула Борели – Жюрена.....	75
№5. Дисперсия света. Спектры. Понятие о спектральном анализе.....	76
№6. Тепловое излучение.....	77
№7. Строение атома.....	79
№8. Рентгеновское излучение и его биологическое действие.....	83
№9. Люминесценция и её виды.....	87
№10. Волновые свойства микрочастиц. Волны де-Бройля.....	89
<b>Приложения</b>	
Приложение 1. Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц.....	92
Приложение 2. Основные физические константы в СИ.....	93
Приложение 3. Связь между различными системами измерения.....	93
<b>Литература.....</b>	<b>95</b>

**Сводная таблица  
учета выполнения и защиты лабораторных работ**

студента \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ курса \_\_\_\_\_ факультета

(Ф. И. О. студента)

№ л/р	Название лабораторной работы	Дата выполнения	Роспись преподавателя о выполнении и оформлении л/р	Роспись преподавателя о защите л/р
1	Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда			
2	Проверка закона сохранения механической энергии			
3	Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса			
4	Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца			
5	Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов			
6	Изучение электроизмерительных приборов. Проверка закона Ома для участка цепи			
7	Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Изучение принципа суперпозиции магнитных полей			
8	Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току			
9	Определение фокусных расстояний и оптической силы линз			
10	Определение концентрации растворов с помощью рефрактометра			

## **Инструкция №19**

по охране труда для студентов, занимающихся в лабораториях  
физического факультета

### **I. Общие требования безопасности**

1.1. К работе в лабораториях физического факультета допускаются студенты, которые получили инструктаж преподавателя и хорошо усвоили требования безопасности. Студенты должны выполнять работу только в присутствии проводящего занятия преподавателя или лаборанта и только под его руководством.

1.2. Допуск посторонних лиц в лабораторию физики в момент проведения занятий разрешается только преподавателем физики.

1.3. Соблюдение требований настоящей инструкции обязательно для студентов, работающих в лаборатории физики.

1.4. Во время проведения работы на студентов могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы:

- колющие и режущие инструменты;
- высокая температура;
- электрическое напряжение;
- ионизирующие излучения;
- лазерное излучение;
- химические вещества;
- поля высокой напряженности;
- возможен взрыв вакуумных приборов или приборов, находящихся под давлением.

**ПОМНИТЕ, ЧТО ОПАСНО ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ И ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЛЮБОЙ ВЕЛИЧИНЫ, ЕСЛИ НЕ СОБЛЮДАТЬ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ.**

1.5. При обнаружении каких-либо неисправностей в приборах электросети, поврежденной лабораторной посуде, электроизоляции проводов надо прекратить работу, отключить электросеть и предупредить преподавателя.

1.6. В случае получения травмы, плохом самочувствии студенты должны сообщить об этом преподавателю.

1.7. Во время работы в лаборатории необходимо проявлять осторожность, соблюдать порядок и гигиену на рабочем месте. Нельзя класть продукты на рабочие столы.

1.8. Поспешность и небрежность в работе, нарушение или невыполнение требований данной инструкции могут привести к несчастному случаю, травме.

### **II. Требования безопасности перед началом работы**

Перед началом работы студент обязан:

2.1. Изучить по пособию последовательность проведения работы.

2.2. Убедиться (при внешнем осмотре), что все приборы, провода, клеммы, защитное заземление находятся в исправном состоянии; Эксплуатация оборудования с неисправными сетевыми вилками, без защитного заземления, без крышек корпуса и т.п. запрещается.

2.3. Изучить опасные факторы, возникающие при проведении работ в лаборатории и способы их предупреждения.

2.4. Освободить рабочие места от всех ненужных для работы предметов.

2.5. Ознакомиться с оборудованием и методическими рекомендациями по выполнению предстоящей работы.

2.6. Соблюдать образцовую дисциплину и тишину, не заниматься ничем посторонним.

2.7. Выполнять все требования преподавателя и лаборанта, вытекающие из хода учебного процесса. Бережно относиться к оборудованию, инструментам, приспособлениям и прочим учебным пособиям.

### **III. Требования безопасности при выполнении работы**

При выполнении работы студент сталкивается со следующими видами работ:

1. Монтаж лабораторных установок.
2. Демонстрация физических экспериментов.
3. Работа с химическими веществами.
4. Научно-исследовательская работа.
5. Работа с лазером.
6. Пайка и электромонтажные работы.
7. Работа на ПЭВМ.
8. Вспомогательные работы.

При выполнении всех видов работ студент обязан соблюдать меры безопасности, оговоренные ниже.

1. При подготовке оборудования к работе необходимо проверить его исправность. Ввод в действие новых приборов произвести согласно инструкции по эксплуатации. Эксплуатация приборов, имеющих знак "!", разрешается только после детального ознакомления с инструкцией по эксплуатации. В ходе работы избегать перегрузок приборов и следить за их исправностью. Приборы, имеющие клеммы, обозначенные знаком "⊥" должны быть заземлены.

2. При монтаже лабораторных установок оборудование располагать согласно схеме. Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание, уясните ход выполнения, выясните наиболее опасные места установки, изучите правила безопасного проведения. Соединительные провода должны иметь исправную изоляцию. Сборку электрических цепей, монтаж и ремонт электрических устройств производить только при отключенном источнике питания. Не включать источники электропитания без проверки цепей преподавателем или лаборантом.

3. Проверять наличие напряжения на источнике питания или других частях электроустановки разрешается с помощью измерителя напряжения. При сборке электрической цепи провода располагать аккуратно, а концы плотно зажимать клеммами.

4. Наблюдения, измерения и опыты производить, соблюдая осторожность, для того чтобы:

- случайно не прикоснуться к оголенным проводам или токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- избежать поражения осколками стекла в результате возможного взрыва при работе с вакуумными приборами или приборами, находящимися под давлением;
- предотвратить утечку химических, радиоактивных и огнеопасных веществ;
- свести к минимуму ионизирующее и лазерное облучение, действие электрических и магнитных полей на людей.

5. При проведении демонстрационных опытов необходимо выполнять все требования п. 2-5. Опыты должны отвечать требованиям пожарной безопасности. Пути эвакуации людей должны быть свободными, их не должны пересекать никакие проводящие шнуры, проходы должны быть свободны от оборудования, мебели и одежды. Запрещается держать на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении задания. Число студентов не должно превышать число оборудованных мест.

6. При работе с химическими веществами необходимо соблюдать правила:

- Работы с ядовитыми, едкими и т.п. веществами проводить в вытяжном шкафу, надев спецодежду, исключив попадание веществ на кожу, слизистые оболочки или внутрь организма.
  - По окончании работ тщательно вымыть руки. Запрещается выливать ядовитые вещества (например, ртуть) в канализационную сеть. Их необходимо сдавать лаборантам по окончании работы.
7. При проведении научно-исследовательской работы необходимо соблюдать п.п. 1-11 настоящей инструкции. Работать на специальном оборудовании можно только тщательно изучив инструкцию по эксплуатации, технике безопасности и получив допуск к работе от ответственного за технику безопасности в лаборатории.
8. При работе с лазером следует располагать лазер и облучаемые объекты так, чтобы избежать попадания прямого, отраженного или преломленного луча в глаза или на незащищенные участки кожи.
9. При проведении пайки эл. паяльником свинцовосодержащими припоями необходимо помнить, что свинец относится к сильнотоксичным веществам. Поэтому пайку лучше проводить в помещении, оборудованном вытяжной вентиляцией, а при невыполнении этого условия чаще проветривать помещение. При пайке необходимо избегать ожогов паяльником или каплями припоя. По окончании работ необходимо убрать припой в место исключаящее испарение свинца (плотно закрывающаяся коробка) и тщательно вымыть руки.
10. При работе на ПЭВМ необходимо соблюдать правила гигиены зрения и эл. безопасности. Запрещается работать у монитора без перерыва более 2 часов. Периодически необходимо делать перерывы в работе для отдыха глаз.
11. При выполнении вспомогательных работ необходимо получить дополнительный инструктаж по ТБ, соответственно с видом работ. Например, ТБ при переноске приборов, при подготовке к зимнему сезону и т.п.

#### **СТУДЕНТАМ ЗАПРЕЩАЕТСЯ**

- Включать в розетку собранную по схеме электрическую цепь без разрешения преподавателя или лаборанта. В случае необходимости каких-либо присоединений в цепи, включать ее можно вторично после просмотра преподавателем или лаборантом.
- Переносить приборы без разрешения преподавателя с одного стола на другой.
- Включать и выключать рубильники группового щита (за исключением оказания помощи пострадавшему от электрического тока).
- Делать какие-либо переключения в схеме при включенном напряжении.
- Касаться руками неизолированных проводов и зажимов в схеме, находящейся в данный момент под напряжением.
- Снимать или перевешивать запрещающие или предупреждающие плакаты.
- Категорически запрещается гасить горящую электропроводку находящуюся под напряжением химически пенным огнетушителем ОХП.
- При попадании человека под напряжение немедленно обесточить всю лабораторию (в каждой учебной лаборатории физического факультета установлены УЗОШ, которые обеспечивают отключение всей лаборатории от электрического тока).
- Если по каким-то причинам не удалось отключить электрическую сеть, то необходимо оттащить пострадавшего за одежду в сторону от устройства, находящегося под напряжением.
- При возникновении аварийной ситуации строго выполнять все указания руководителя, проводящего занятия.

#### **IV. Требования безопасности в аварийных ситуациях**

К аварийным ситуациям могут привести:

- отсутствие должной организованности, требовательности и контроля за состоянием охраны труда;
- несоответствие нормам и правилам ТБ рабочих мест и оборудования, на котором работают;
- несоблюдение правил ТБ или их незнание;
- работа на неисправном оборудовании, работа без защитных средств.

При возникновении аварийных ситуаций студент должен немедленно отключить электропитание, воду, газ и сообщить об этом преподавателю или лаборанту, оказать помощь пострадавшему в соответствии с инструкцией №2 по оказанию первой помощи, при необходимости принять меры по срочной эвакуации. После чего, под руководством ответственных лиц, должны быть приняты меры по устранению аварии и ее последствий с привлечением соответствующих служб.

#### **V. Требования безопасности по окончании работы**

По окончании работы необходимо проверить оборудование, о неисправных приборах сообщить лаборанту или преподавателю. Сдать химические реактивы, радиоактивные препараты лаборанту. Дождаться пока нагревающиеся приборы (паяльники, муфельные печи и т.п.) остынут до безопасной температуры. Перед уходом выключить электропитание, воду.

### **Методы вычисления погрешностей**

Никакое измерение не дает истинного значения определяемой величины. Всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой, или погрешностью. Поэтому недостаточно знать только результат измерения, необходимо еще определить величину допущенной погрешности. Погрешности делятся на *систематические и случайные*.

*Систематические* ошибки возникают из-за неисправности или несовершенства измерительных приборов. Например, из-за смещения нуля измерительных приборов (амперметра, вольтметра и др.) все отсчеты будут искажены. Такие недостатки приборов изменяют результат измерений всегда в одну сторону, или увеличивая, или уменьшая его.

Систематические ошибки могут быть допущены также в процессе работы, если теория опыта недостаточно разработана и не учтены все причины, влияющие на точность измерений. Например, при определении сопротивления проводников, растворов не учтена поправка на температуру и т.д.

Систематические ошибки могут быть значительно уменьшены при более тщательном изучении приборов и устранения их недостатков, при более подробной разработке теории опыта и введении поправочных коэффициентов в результат измерений. Характерно, что увеличение числа измерений не уменьшит систематических ошибок.

*Случайные* ошибки вызываются неточностью отсчета, которую невольно допускает каждый экспериментатор. Например, недостаток органов зрения, органов слуха, реакции включения и выключения приборов отсчета времени и т.д.

В отличие от систематических случайные ошибки могут изменять результат измерений в обе стороны, т.е. увеличивать или уменьшать его. Поэтому для уменьшения влияния случайных ошибок необходимо всякое измерение проводить несколько раз ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ).



Случайные ошибки подчиняются законам вероятности. Это значит, если при каком-либо измерении получится результат больше истинного, то при следующих измерениях столь же вероятно может получиться результат меньше истинного. Очевидно, многократные повторения одного и того же измерения уменьшают влияние случайных ошибок, так как нет основания считать отклонение от истинного значения в одну сторону более вероятным, чем в другую, и среднее арифметическое из большого числа измерений будет ближе к истинному значению, чем отдельные измерения.

### Математический аппарат вычисления случайных ошибок прямых измерений

1. При измерении какой-либо величины получают ряд значений:

$$(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (1)$$

2. Вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (2)$$

3. Вычисляют отклонения отдельного измерения от среднего арифметического значения, т.е. абсолютную ошибку:

$$\Delta x_1 = |x_{cp} - x_1|; \Delta x_2 = |x_{cp} - x_2|; \Delta x_3 = |x_{cp} - x_3|; \dots; \Delta x_n = |x_{cp} - x_n|. \quad (3)$$

4. Вычисляют среднее арифметическое численных значений отдельных абсолютных ошибок, т.е. **среднюю абсолютную ошибку** всех измерений записывают как:

$$\langle \Delta x \rangle = \Delta x_{cp} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n}{n}. \quad (4)$$

5. Тогда результат измерения:

$$x = \langle x \rangle \pm \langle \Delta x \rangle. \quad (5)$$

7. Отношение средней абсолютной ошибки всех измерений  $\langle \Delta x \rangle$  к среднему арифметическому значению  $\langle x \rangle$  измеряемых величин называется **средней относительной ошибкой**:

$$\varepsilon = \delta = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle} 100\%. \quad (6)$$

#### Пример:

1. Пусть при  $n=3$  измерений сопротивления проволоки с помощью прибора ЕС-11 получены следующие числовые значения  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ :

$$R_1 = 5,0 \text{ Ом}; \quad R_2 = 4,9 \text{ Ом}; \quad R_3 = 5,1 \text{ Ом}.$$

2. Найдем среднее арифметическое значение величины по формуле (2):

$$\langle R \rangle = \frac{5,0 + 4,9 + 5,1}{3} = 5,0 \text{ (Ом)}.$$

3. Вычислим абсолютные ошибки измерения по формуле (3):

$$\Delta R_1 = |5,0 - 5,0| = 0 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_2 = |5,0 - 4,9| = 0,1 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_3 = |5,0 - 5,1| = 0,1 \text{ (Ом)}$$

4. Вычислим среднюю абсолютную ошибку по формуле (4):

$$\langle \Delta R \rangle = \frac{0 + 0,1 + 0,1}{3} = 0,07 \text{ (Ом)}.$$

5. Запишем результат измерения по формуле (5):

$$R = (5,0 \pm 0,07) \text{ Ом}.$$

6. Определим относительную ошибку измерения по формуле (6):

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta R \rangle}{\langle R \rangle} \cdot 100\% = \frac{0,07}{5,0} \cdot 100\% = 1,4\%.$$

## Лабораторная работа №1

### Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда

**Цель работы:** изучить основные характеристики кинематики равномерного и равноускоренного прямолинейного движения, научиться их определять. Изучить законы динамики поступательного движения, научиться находить ускорение тела как результат действия на него многих сил. Убедиться в справедливости второго закона Ньютона.

**Приборы и принадлежности:** машина Атвуда, перегрузы, секундомер.

### Теория работы

**Кинематика** – это раздел физики, который изучает законы движения тел без учета причин, вызывающих это движение.

Для простоты изучения движения вводят понятие материальной точки.

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

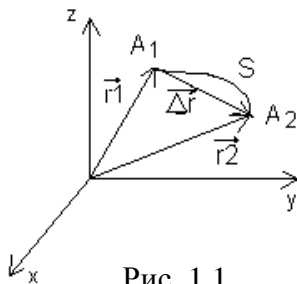


Рис. 1.1

Система координат и связанная с ней материальная точка вместе образуют **систему отсчёта**.

**Траектория** – это линия, которую описывает тело в процессе своего движения (Рис.1.1).

**Путь (S)** – это длина линии, вдоль которой движется тело, т.е. длина траектории.

Положение точки в системе отсчета задается **радиус-вектором**  $\vec{r}$  – это вектор, соединяющий начало координат с материальной точкой.

Пусть тело движется по криволинейной траектории (Рис.1.1) из положения  $A_1$  в положение  $A_2$ . Тогда радиус-вектор изменится от  $\vec{r}_1$  до  $\vec{r}_2$ .

**Перемещение**  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$  – это вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела.

Для характеристики движения вводят два вида скорости:

Средняя скорость – это скалярная физическая величина, численно равная отношению пути ко времени, за который этот путь пройден:

$$v_{cp} = \frac{S}{t} . \quad (1.1)$$

Мгновенная скорость – это изменение радиус – вектора за единицу времени или его производная по времени:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} . \quad (1.2)$$

Размерность скорости:  $v = \frac{м}{с}$ .

Так как в процессе движения скорость может изменяться, то для характеристики быстроты изменения скорости используется мгновенное ускорение. **Ускорение** – это физическая величина, численно равная изменению скорости за единицу времени. **Мгновенное ускорение** – это ускорение тела в заданный момент времени.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}' . \quad (1.3)$$

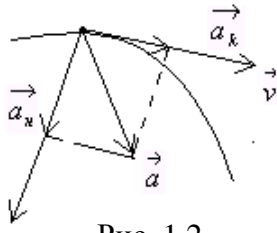


Рис. 1.2

Если на материальную точку действует некоторое ускорение  $\vec{a}$  (Рис.1.2), то его можно разложить на две составляющие: касательное ускорение  $\vec{a}_k$ , направленное по касательной к траектории, и нормальное или центростремительное ускорение  $\vec{a}_n$ , направленное перпендикулярно к скорости. Тогда вектор полного ускорения определяется по правилу сложения векторов – по правилу параллелограмма:

$$\vec{a} = \vec{a}_k + \vec{a}_n.$$

А его величина определяется по теореме Пифагора:

$$|a| = \sqrt{|\vec{a}_k|^2 + |\vec{a}_n|^2}. \quad (1.4)$$

Так как касательное ускорение  $\vec{a}_k$  совпадает по направлению с направлением скорости  $\vec{v}$ , то оно характеризует изменение скорости по величине. Так как нормальное ускорение  $\vec{a}_n$  перпендикулярно вектору скорости  $\vec{v}$ , то оно характеризует изменение скорости по направлению. Но касательное ускорение  $a_k = \frac{dv}{dt}$ , а

нормальное ускорение  $a_n = \frac{v^2}{R}$  где  $R$  – радиус кривизны траектории. Тогда величина полного ускорения:

$$|a| = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2}. \quad (1.5)$$

В зависимости от наличия касательного  $\vec{a}_k$  и нормального ускорений  $\vec{a}_n$  различают четыре вида движения:

**1-й вид движения:** Когда и касательное и нормальное ускорения отсутствуют, т.е. равны нулю:  $\vec{a}_n = 0$  и  $\vec{a}_k = 0$ , тогда скорость остается постоянной:  $\vec{v} = \text{const}$ . Такой вид движения, при котором вектор скорости остается постоянным (т.е. не меняется ни по величине, ни по направлению), называется **равномерным и прямолинейным**.

Необходимо обратить Ваше внимание на то, что в определении равномерного и прямолинейного движения – движение Мы назвали с помощью двух слов «Равномерное» и «Прямолинейное». Часто на этот принципиальный момент не обращают должного внимания. Слово «Равномерное» означает то, что вектор скорости не изменяется по величине (т.к. отсутствует касательное ускорение). Слово «Прямолинейное» означает то, что вектор скорости не изменяется по направлению (т.к. отсутствует нормальное ускорение).

Примером такого вида движения может быть случай, когда Вы едете на машине, нажимая на акселератор (педаль «Газ») с одинаковым усилием (т.е. не разгоняя и не тормозя машину), и держите все время «Руль» прямо. Т.е. педали «Газ» и «Тормоз» создают касательное ускорение, изменяющее величину вектора скорости, а «Руль», управляющий колесами машины создает нормальное ускорение, изменяющее направление вектора скорости.

Скорость при равномерном и прямолинейном движении определяется наиболее просто, как путь, пройденный за единицу времени:

$$v = \frac{S}{t}. \quad (1.6)$$

**2-й вид движения:** Когда на тело действует касательное ускорение не равное нулю ( $\vec{a}_k \neq 0$ ), но нормального ускорения нет ( $\vec{a}_n = 0$ ). Тогда полное ускорение равно касательному, т.е.  $\vec{a} = \vec{a}_k$  и вектор скорости изменяется по величине  $|v| \neq \text{const}$  (причем за равные промежутки времени модуль скорости изменяется на одинаковую величину - поэтому такое движение **равнопеременное**: равноускоренное или равнозамедленное). Т.к. нормальное ускорение равно нулю, то, как и в 1-м виде движения, вектор скорости не изменяется по направлению, т.е. движение происходит по прямой линии - **прямолинейное движение**. Таким образом, собирая эти две характеристики, назовем: *такой вид движения, при котором на тело действует только касательное ускорение называется равнопеременным и прямолинейным*. Например, Вы едете на машине, равномерно увеличивая модуль скорости (увеличивая давление на педали «Газ» или «Тормоз»), и удерживая «Руль» в одном и том же положении.

Скорость и путь при равнопеременном прямолинейном движении:

$$v = v_0 + at, \quad (1.7)$$

$$S = S_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}, \quad (1.8)$$

где «+» - равноускоренное, «-» - равнозамедленное движение;

**3-й вид движения:** Когда на тело действует отличное от нуля нормальное ускорение  $\vec{a}_n \neq 0$ , но касательного ускорения нет  $\vec{a}_k = 0$  (т.е. модуль скорости остается постоянным  $|v| = \text{const}$ ). Тогда полное ускорение  $\vec{a} = \vec{a}_n$  и вектор скорости одинаково изменяется по направлению за равные промежутки времени ( $\vec{v} \neq \text{const}$ ). *Такое движение, при котором на тело действует только нормальное ускорение, называется равномерным движением по окружности*. Например, Вы едете на машине нажимая на «Газ» с одинаковым усилием (т.е. не разгоняя и не тормозя машину), но «Руль» держите постоянно повернутым на одинаковый угол.

**4-й вид движения:** Когда на тело действует отличное от нуля и касательное  $\vec{a}_k \neq 0$  и нормальное  $\vec{a}_n \neq 0$  ускорения. Этот случай является наиболее общим случаем движения, обобщающим 2-й и 3-й случаи. Тогда полное ускорение и его абсолютная величина находятся по формулам (1.4), (1.5), а величина скорости и путь по формулам (1.7), (1.8). *Такой вид движения, при котором на тело действует и касательное и нормальное ускорение называется равнопеременным криволинейным движением*.

**Динамика** изучает движение тел и причины, вызывающие это движение. Изучение причин возникновения движения тел сводится к трём законам Ньютона.

Для того, чтобы тело пришло в движение необходимо действие на него какого-то другого тела.

*Мерой воздействия одного тела на другое является сила  $\vec{F}$ .*

Если одинаковая сила действует на разные тела, то они по-разному будут реагировать на это воздействие. Такая способность тел по-разному реагировать на одинаковое воздействие называется **инертностью тела**.

**Инерция** – это способность тела находиться в состоянии покоя или в состоянии равномерного и прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или действие всех тел взаимно скомпенсировано.

*Мерой инертности тела является масса  $m$ .*

**Первый закон Ньютона:** существуют такие системы отсчёта (инерциальные), относительно которых тела находятся в состоянии покоя или движутся

ся равномерно и прямолинейно, если на них не действуют никакие силы или действие всех сил взаимно скомпенсировано. Математически это можно записать:

$$\vec{v} = 0 \quad \text{или} \quad \vec{v} = \text{const} \quad , \quad \text{если} \quad \vec{F} = 0 \quad \text{или} \quad \sum \vec{F} = 0 \quad . \quad (1.9)$$

**Второй закон Ньютона:** ускорение, которое приобретает тело под действием силы или суммы сил, действующих на него, прямо пропорционально сумме сил, направлено в сторону равнодействующей этих сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \quad . \quad (1.10)$$

И как следствие

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad . \quad (1.11)$$

**Третий закон Ньютона:** два тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по величине и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1} \quad \text{и} \quad |\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}| \quad . \quad (1.12)$$

В данной лабораторной работе предлагается исследовать:

### I. Законы кинематики поступательного движения.

1. прямолинейное равномерное движение, при котором необходимо определить скорость равномерного движения с использованием формулы (1.6);
2. прямолинейное равноускоренное движение, при котором необходимо определить ускорение тела двумя способами:
  - а) по формуле (1.7) для скорости равноускоренного движения;
  - б) по формуле (1.8) для пути при равноускоренном движении.

### II. Законы динамики поступательного движения.

Второй закон Ньютона (1.10), с помощью которого определить ускорение как результат действующих на тело сил.

### III. Соответствие между двумя способами описания движения на основании кинематики и динамики поступательного движения.

На основании сравнения ускорений, найденных различными методами кинематики и динамики необходимо сделать вывод о применимости данных формул.

## Теория лабораторной работы

Основные законы кинематики и динамики могут быть проверены опытным путем на машине Атвуда (Рис.1.3). Машина Атвуда состоит из вертикальной штанги 6 со шкалой, сверху которой установлен легкий блок 1, способный вращаться с незначительным трением. Через блок перекинута тонкая нить с прикрепленными грузами 2 одинаковой массы  $m$ . Грузы могут быть установлены на передвигающейся по вертикальной штанге подставке 5, которая может быть снабжена электромагнитом для удержания грузов. На штанге крепится кольцо 4, предназначенное для снятия перегрузка массой  $m_1$ , под действием которого грузы приходят в движение.

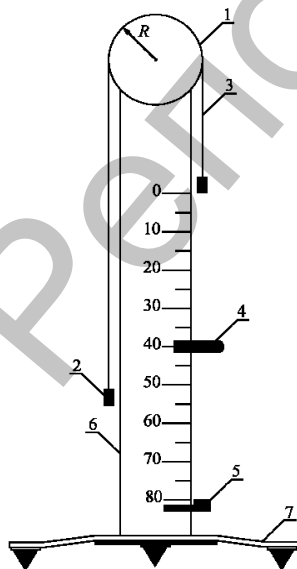


Рис. 1.3

Рассмотрим движение системы, состоящей из двух грузов массой  $m$  и  $m+m_1$  и блока радиусом  $r$  с моментом инерции  $J$ .

Если грузы одинаковы, то потенциальная энергия системы не зависит от их высоты, т.к. убыль энергии одного груза приводит к эквивалентному возрастанию потенциальной энергии другого. Когда грузы различны, из-

менение потенциальной энергии системы определяется положением перегрузка массой  $m_1$ .

Согласно закона сохранения энергии (работой сил трения пренебрегаем) изменение потенциальной энергии системы  $\Delta E = m_1gh$  переходит в кинетическую энергию поступательного и вращательного движения, т.е.:

$$m_1gh = \frac{mv^2}{2} + \frac{m + m_1}{2} v^2 + \frac{J\omega^2}{2} . \quad (1.13)$$

где  $h = \frac{at^2}{2}$  - высота опускания груза с перегрузом,  $\omega = \frac{v}{r}$  - угловая скорость вращения,  $v = at$  - линейная скорость. Подставляя значения  $h$ ,  $\omega$ ,  $v$  в (1.13), получим:

$$a = \frac{m_1g}{2m + m_1 + \frac{J}{r^2}} . \quad (1.14)$$

Если пренебречь моментом инерции блока, формула (2.14) примет вид:

$$a = \frac{m_1g}{2m + m_1} . \quad (1.15)$$

## Порядок выполнения работы

### Задание №1

#### Исследование кинематики прямолинейного равномерного движения

При выполнении данного задания необходимо определить скорость равномерного прямолинейного движения груза с двумя перегрузками (треугольной и круглой формы) на участке пути  $S' = 0,3$  м, для чего:

1. Установить верхнюю платформу на отметке 30 см, а нижнюю платформу на отметке 60 см. (Расстояние между ними  $S' = 0,3$  м).
2. Удерживая правый груз в верхнем положении, положить на него оба перегрузка (сначала треугольный, а затем круглый).
3. Поднять правый груз с перегрузками до отметки 0 (отсчет уровня производить по верху груза. При этом начальное расстояние, на котором происходит ускоренное движение  $S = 0,3$  м – это путь разгона. Начальная скорость при движении системы из состояния покоя  $v_0 = 0$ ).
4. Отпустить груз. При этом груз с перегрузками начнет двигаться равноускоренно за счет силы тяжести, действующей на перегрузки. Скорость системы будет увеличиваться до того момента, когда перегрузки окажутся снятыми платформой 4. С этого момента груз будет двигаться равномерно.
5. В момент, когда перегрузки окажутся снятыми платформой 4, включить секундомер и выключить его в момент, когда груз коснется нижней платформы.
5. При этом вы измерить время равномерного движения  $t'$ .
6. Опыт повторите 3 раза при одном и том же начальном пути разгона  $S$ .
7. Повторить серию опытов при начальном пути разгона  $S = 0,25$  м. Для этого движение груза с перегрузками должно начинаться не от 0, а от отметки 5 см.
8. Используя формулу (1.6), вычислить скорости равномерного движения, учитывая, что путь равномерного движения в данном задании  $S = S' = 0,3$  м.
9. Вычислить среднее значение скорости равномерного движения при двух значениях начального пути разгона.
10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

Равномерное движение при $S'=0,3$ м				
Путь разгона	№ опыта	$t',$ с	$v,$ м/с	$v_{cp},$ м/с
$S=0,3$ м	1			
	2			
	3			
$S=0,25$ м	4			
	5			
	6			

### Задание №2

#### Исследование кинематики прямолинейного равноускоренного движения

При выполнении данного задания необходимо определить ускорение при движении груза с двумя перегрузками (треугольной и круглой формы) на участках пути разгона  $S=0,3$  м и  $S=0,25$  м, для чего:

1. Повторить те же действия, что и в пунктах 1,2,3 задания №1.
2. Отпустить груз и одновременно включите секундомер. Выключить секундомер в момент снятия перегрузов верхней платформой 4. При этом вы измерить время равноускоренного движения  $t$ .
3. Опыт повторить 3 раза при одном и том же пути разгона  $S$ .
4. Повторить серию опытов при начальном пути разгона  $S=0,25$  м.
5. Найти среднее значение времени равноускоренного движения для каждого пути разгона.
6. Используя формулу (1.7), вычислить ускорение  $a_1$  равноускоренного движения при учете, что движение начиналось из состояния покоя, т.е. с начальной скоростью  $v_0=0$ , а конечная скорость в момент снятия перегрузов – это скорость равномерного движения, измеренная в задании №1. Тогда:

$$a_1 = \frac{v_{cp.}}{t_{cp.}}$$

7. С другой стороны, величину ускорения  $a_2$  можно вычислить по формуле (1.8) для пути при равноускоренном движении, при учете, что начальное расстояние  $S_0=0$ . Тогда:

$$a_2 = \frac{2S}{t^2}$$

8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2.

Путь разгона	№ опыта	$t,$ с	$t_{cp.},$ с	$v_{cp},$ м/с	$a_1,$ м/с <sup>2</sup>	$a_2,$ м/с <sup>2</sup>
$S=0,3$ м	1					
	2					
	3					
$S=0,25$ м	4					
	5					
	6					

## Вычисления к заданию №2:

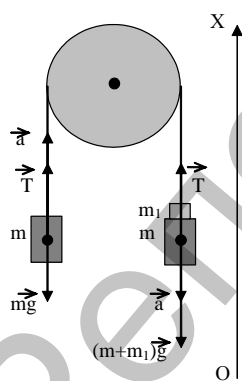


Рис.2.3

### Задание №3

#### Исследование динамики поступательного движения

Для каждого тела применяем второй закон Ньютона:

$$\begin{cases} \vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}; \\ \vec{T} + (m + m_1)\vec{g} = (m + m_1)\vec{a}. \end{cases}$$

Проектируем все вектора на ось  $OX$ :

$$\begin{cases} T - mg = ma; \\ T - (m + m_1)g = -(m + m_1)a. \end{cases}$$

Решаем систему уравнений и получаем выражение для теоретического ускорения:

$$a_{\text{теор.}} = \frac{m_1 g}{2m + m_1}. \quad (1.16)$$

1. Подставляя в формулу (1.16) массы:  $m$  – груза и  $m_1$  – суммарная масса перегрузов, вычислить теоретическое ускорение. Записать его в таблицу 3.
2. Записать из таблиц 1 и 2 значения экспериментально найденных ускорений  $a_1$  и  $a_2$  и сравнить их с теоретическим значением для двух случаев начального пути разгона.
3. Сделать вывод о применимости второго закона Ньютона.



Таблица 3.

$m =$			
$m_1 =$			
Путь разгона	$a_1, \text{ м/с}^2$	$a_2, \text{ м/с}^2$	$a_{теор}, \text{ м/с}^2$
$S=0,3 \text{ м}$			
$S=0,25 \text{ м}$			

**Вывод:**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:**

1. Что изучает кинематика, динамика?
2. Дайте определения: материальной точки, траектории, перемещения, пути.
3. Запишите и сформулируйте определения средней и мгновенной скорости, ускорения.
4. Нарисуйте и объясните разложение вектора ускорения на составляющие. Как называются два вида ускорения, на какие характеристики вектора скорости они влияют? Запишите формулу полного ускорения.
5. Какие существуют виды поступательного движения? Объясните их с точки зрения наличия касательного и нормального ускорения.
6. Что такое инертность тела, масса, сила?
7. Запишите и дайте определения первого, второго и третьего законов Ньютона.
8. Объясните методику изучения кинематики прямолинейного равномерного и равноускоренного движения. Запишите и объясните расчетные формулы для определения скорости и ускорения.
9. Нарисуйте и объясните силы, действующие на механическую систему. Сделайте вывод формулы теоретического ускорения на основании второго закона Ньютона.
10. Сделайте вывод о корректности применения второго закона Ньютона.

## Лабораторная работа №2

### Проверка закона сохранения механической энергии

**Цель работы:** изучить закон сохранения энергии. Научиться: рассчитывать потенциальную и кинетическую энергию тела; давать трактовку различию получаемых экспериментальных результатов; оценивать критерий достоверности полученных экспериментальных результатов. Убедиться в справедливости закона сохранения механической энергии.

**Приборы и принадлежности:** установка для проверки закона сохранения механической энергии, шарик, линейка, листы белой и копировальной бумаги.

#### Теория работы

Если под действием силы  $F$  тело перемещается на некоторое расстояние  $dr$  (Рис.3.1), то говорят, что эта сила совершает **работу**. Работа  $A$  зависит от силы

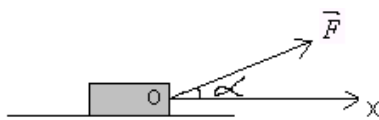


Рис.2.1

и расстояния, поэтому бесконечно малая работа на участке  $dr$ :

$$dA = F \cdot dr \cdot \cos \alpha, \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением векторов силы  $\vec{F}$  и перемещения  $d\vec{r}$ . Полная работа равна сумме всех бесконечно малых работ (3.1) на каждом бесконечно малом участке:  $A = \sum dA$ . Но в математи-

ке, сумма бесконечно малых величин находится с помощью действия – интегрирования, тогда:

$$A = \int_0^S F dr, \quad (2.2)$$

где вектор перемещения изменяется от начального значения – 0, до конечного –  $S$ . Если сила постоянна ( $\vec{F} = \text{const}$ ), то ее можно вынести за знак интеграла, а интеграл от перемещения  $dr$  даст нам величину пути:

$$A = F \cos \alpha \cdot \int_0^S dr = FS \cos \alpha. \quad (2.3)$$

Размерность работы:  $A = \text{Н} \times \text{м} = \text{Дж}$  (Джоуль).

Работа может совершаться быстрее или медленнее. Для такой способности силы используется понятие **мощность** – это работа, совершаемая за единицу времени:

$$N = \frac{A}{t} \quad (2.4)$$

Размерность работы:  $N = \text{Дж/с} = \text{Вт}$  (Ватт).

Так как работу совершает какая-либо сила, а сила – это мера воздействия одного тела на другое, то работа силы – это работа одного тела над другим телом.

*Способность тела совершать работу при переходе из одного состояния в другое называется энергией.*

Работа может совершаться двумя способами:

1) Путём непосредственного воздействия (удар, давление). При этом тело, совершающее работу до момента воздействия должно двигаться ко второму телу. Тогда говорят, что такое тело обладает **кинетической энергией** (кинетика – движение):

$$W_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.5)$$

**Кинетическая энергия – это энергия движения.**

2) Путём воздействия на расстоянии (притяжение гравитационным полем, притяжение или отталкивание электрическим полем). При этом тело, над которым совершает работу некоторое поле, получает от этого поля энергию, называемую **потенциальной**. Примеры:

а) Тело, находящееся над поверхностью Земли на некоторой высоте  $h$  обладает, за счёт гравитационного поля Земли потенциальной энергией:

$$W_n = mgh \quad (2.6)$$

Такая потенциальная энергия называется - **потенциальная энергия в поле силы тяжести**.

б) При упругой деформации тела происходит взаимное смещение атомов в кристаллической решетке, и начинают действовать силы электрического поля – отталкивания или притяжения зарядов. В результате электрическое поле внутри тела совершает работу по восстановлению прежних размеров тела. Энергия, которую при этом расходует электрическое поле, называется **потенциальной энергией упругой деформации**:

$$W_n = \frac{k \cdot \Delta x^2}{2}, \quad (2.7)$$

где  $k$  – коэффициент упругости (жёсткости);  $\Delta x$  - абсолютная деформация тела.

**Потенциальная энергия – это энергия, которой обладает тело в поле!**

Если тело движется в каком-либо поле, то оно обладает одновременно и кинетической и потенциальной энергией. Полной механической энергией тела называется сумма его кинетической и потенциальной энергий:

$$W = W_k + W_n \quad (2.8)$$

Если тело совершает работу, то  $A = W - W_0$ , т. е. работа, совершаемая телом, равна разности полной энергии в начальном и конечном состояниях.

Если добавить к полной механической внутренней энергии тела (энергию теплового хаотического движения атомов и молекул, из которых состоит само тело) и тепловую, которую теряет тело, например при ударе, то мы получим **полную энергию тела**:

$$W = W_k + W_n + W_{вн} + W_{тепл} \quad (2.9)$$

В замкнутой системе (система, в которой тела взаимодействуют только друг с другом и никакие внешние силы на систему не действуют) справедлив **закон сохранения полной энергии**: *полная энергия в замкнутой системе ниоткуда не возникает, никуда не исчезает, а только может превращаться из одних видов в другие или может быть израсходована на совершение работы*.

Если в механической системе действуют только консервативные силы (сила тяжести, сила упругости), то для нее выполняется закон сохранения механической энергии:

$$W = W_k + W_n = \text{const} \quad (2.10)$$

*Т.е.: полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют только консервативные силы, есть величина постоянная.*

В такой системе может происходить только превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно, но полный запас энергии при этом не изменяется.

Если же в системе, кроме консервативных сил, действуют еще и неконсервативные силы (силы трения), то полная механическая энергия не сохраняется. Работа неконсервативных сил  $A_{н.к.} = W_2 - W_1$  (2.11) равна уменьшению энергии системы.

Для неконсервативных сил применяется также другое название – **диссипативные силы**. А сам процесс убыли энергии (например, под действием силы трения) называется **диссипацией энергии**. Говорят, что энергия **диссипирует** в ок-

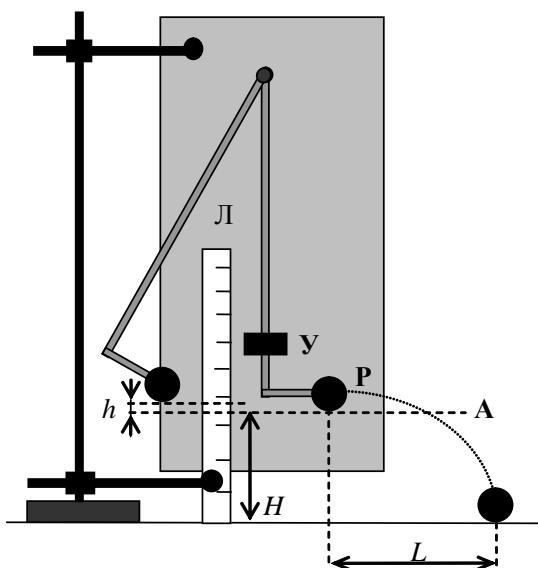


Рис.2.2

При ударе стержня об упор **У** шарик срывается со стержня и движется по параболе. Измеряя дальность полета  $L$  и высоту падения шарика  $H$ , можно найти его скорость в момент отрыва от стержня – в точке **Р**.

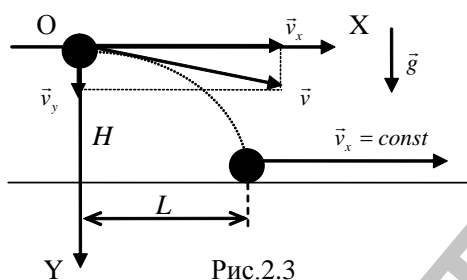


Рис.2.3

Спроектируем вектор скорости в момент отрыва шарика от стержня на оси  $OX$  и  $OY$  (Рис.2.3). Учтем, что на шарик действует только сила тяжести, направленное вертикально вниз (вдоль оси  $OY$ ). Поэтому, будет увеличиваться только игрековая компонента скорости  $\vec{v}_y$ . При этом, движение вдоль оси  $OY$  будет равноускоренным. Вдоль оси  $OX$  ускорение равно нулю, поэтому, компонента скорости  $\vec{v}_x = \text{const}$  будет оставаться постоянной и движение вдоль оси  $OX$  будет равномерным. Но скорость при равномерном движении вдоль оси  $OX$  можно найти по формуле (1.6):

$$v_x = \frac{L}{t} . \quad (2.14)$$

Нам остается найти время полета. Для этого учтем, что нам известно расстояние, пройденное шариком вдоль оси  $OY$  – это высота  $H$ , с которой падает шарик. А расстояние, пройденное телом при равноускоренном движении вдоль оси  $OY$ , можно найти по формуле (1.8):

$$H = v_{0y}t + \frac{gt^2}{2} .$$

Учитывая, что начальная скорость вдоль оси  $OY$  в момент отрыва  $v_{0y} = 0$ , то уравнение для высоты полета:  $H = \frac{gt^2}{2}$ , откуда найдем время полета:

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} . \quad (2.15)$$

Подставляя время полета (2.15) в выражение скорости (2.14), получим:

$$v = v_x = L\sqrt{\frac{g}{2H}} . \quad (2.16)$$

Подставляя скорость (2.16) в выражение кинетической энергии (2.13):

ружающую среду. А сами системы, в которых энергия не сохраняется, называются **диссипативными**.

Экспериментальная установка для проверки закона сохранения механической энергии показана на рис.2.2.

При отклонении шарика на высоту  $h$  относительно уровня **А** его полная энергия будет равна потенциальной:

$$W_n = mgh . \quad (2.12)$$

При движении стержня с шариком до положения равновесия **Р**, потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию поступательно-

го движения тела:  $W_k = \frac{mv^2}{2}$  . (2.13)

$$W_k = \frac{mgL^2}{4H} . \quad (2.17)$$

Сравнивая значения потенциальной (3.12) и кинетической (2.17) энергий, можно экспериментально проверить закон сохранения механической энергии.

### Порядок выполнения работы

1. Найти массу шарика с помощью весов.
2. Закрепить шарик на стержне и измерить высоту  $H$  над уровнем стола.
3. Отклонить стержень с шариком на некоторый угол и измерить высоту подъема шарика  $h$  относительно положения равновесия (уровня А).
4. Отпустить шарик и измерить дальность полета  $L$ , используя для фиксации точек падения шарика листы белой и копировальной бумаги.
5. Для данного угла отклонения стержня, опыт повторить 5 раз.
6. Провести аналогичные измерения для другого угла отклонения стержня.
7. По формуле (2.12) рассчитать потенциальную энергию шарика в момент отклонения от положения равновесия.
8. По формуле (2.17) найти кинетическую энергию шарика в момент отрыва.
9. Для каждой серии опытов рассчитать среднее значение потенциальной и кинетической энергии.
10. Сравнить  $\langle W_k \rangle$  в момент отрыва шарика с  $\langle W_n \rangle$  при максимальном отклонении от положения равновесия. Сделать вывод о справедливости закона сохранения механической энергии.
11. Вычислить абсолютную погрешность  $\Delta W_k$  определения кинетической энергии.
12. Вычислить абсолютную погрешность  $\Delta W_n$  определения потенциальной энергии, учитывая приборную погрешность:  $\Delta W_n = mg\Delta l / 3$ , где  $\Delta l = 1$  мм – цена деления измерительной линейки.
13. Вычислить критерий достоверности полученных результатов по выражению:  $|W_n - W_k| < \sqrt{\Delta W_n^2 + \Delta W_k^2}$ . Если данное неравенство выполняется, то опыт проведен достаточно точно и вывод о выполнении закона сохранения механической энергии правомерен.
14. Данные измерений и вычислений занести в таблицу.

Масса шарика $m =$								
Высота падения шарика $H =$								
Потенциальная энергия					Кинетическая энергия			
№	$h,$ м	$W_n,$ Дж	$\langle W_n \rangle,$ Дж	$\Delta W_n,$ Дж	$L,$ м	$W_k,$ Дж	$\langle W_k \rangle,$ Дж	$\Delta W_k,$ Дж
1								
2								
3								
4								
5								
1								
2								
3								
4								
5								

## Вычисления:

## Вывод:

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Сделайте вывод формул и дайте определения: работа, мощность, энергия.
2. Запишите и сформулируйте закон сохранения механической энергии. Всегда ли он справедлив?
3. Приведите примеры, иллюстрирующие выполнение (не выполнение) закона сохранения механической энергии, дайте пояснения.
4. Как называются механические силы и системы, в которых не выполняется закон сохранения энергии? Что происходит при этом с энергией?
5. Назовите причины не точного выполнения закона сохранения механической энергии в рамках данной лабораторной работы.

## Лабораторная работа №3

### Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

**Цель работы:** изучить характеристики вязкой жидкости, научиться измерению вязкости жидкости методом Стокса.

**Приборы и принадлежности:** штатив, стеклянная трубка с машинным маслом, пипетка, стакан, секундомер, линейка, весы с разновесами.

### Теория работы

При движении с различными скоростями слоев жидкости или газа между ними возникает трение, названное внутренним трением или вязкостью. В дополнение к этому между слоями молекул, смещающихся друг относительно друга, существуют силы взаимодействия. Сила внутреннего трения определяется из

уравнения Ньютона:

$$F_{тр} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (3.1)$$

где  $\eta$  - коэффициент внутреннего трения или вязкости;  $\Delta v / \Delta x$  - градиент скорости;  $S$  - площадь соприкасающихся слоев.

**Сила внутреннего трения прямо пропорциональна градиенту скорости и площади соприкасающихся слоев.**

Если выразить из (3.1) коэффициент вязкости  $\eta$ , то получим: 
$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta x} S},$$

тогда **коэффициент вязкости численно равен силе трения между слоями жидкости при единице площади их соприкосновения, если градиент скорости равен единице.** В системе СИ единица измерения вязкости - Па·с (Па - паскаль):

$$\eta = \frac{F}{\left[ \frac{\Delta v}{\Delta x} \right] \cdot S} = \frac{Н \times м}{\frac{м}{с} \times м^2} = \frac{Н \times с}{м^2} = Па \times с$$

При небольшой скорости течения жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят один относительно другого не перемешиваясь. Такое слоистое течение называется **ламинарным**. При движении тела в вязкой жидкости с небольшими скоростями обтекание тела жидкостью также будет ламинарным. В этом случае сила сопротивления движению тела со стороны жидкости определяется по закону Стокса. Для тела сферической формы:

$$F_c = 6 \pi \eta r \cdot v,$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости,  $r$  - радиус тела,  $v$  - скорость движения тела в жидкости.

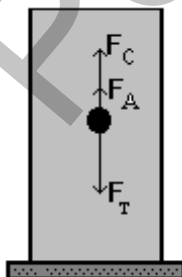


Рис. 3.1

При установившемся движении шарика плотностью  $\rho_{ш}$  в исследуемой жидкости плотностью  $\rho_{ж}$  на шарик действуют силы тяжести  $F_T$ , сила сопротивления  $F_C$  и сила Архимеда  $F_A$  (Рис.3.1). По первому закону Ньютона при равномерном движении шарика в жидкости сумма всех действующих на него сил равна нулю:

$$F_T - F_A - F_C = 0,$$

тогда:

$$F_T = F_A + F_C \quad (3.2)$$

Учитывая, что масса шарика  $m = \rho_{ш} V$ , где  $V$  - объем шара, равный  $V = 4/3 \pi r^3$ , где  $r$  - радиус шарика, получаем

$$m = 4/3 \pi r^3 \rho_{ш}.$$

Тогда сила тяжести:  $F_T = mg = 4/3\pi r^3 \rho_{ш} g$ .  
 Сила сопротивления:  $F_C = 6\pi\eta r v$ , где  $v$  - скорость движения тела.  
 Архимедова сила:  $F_A = \rho_{ж} V g = 4/3\pi r^3 \rho_{ж} g$ .  
 Тогда выражение (3.2) принимает вид:

$$4/3\pi r^3 \rho_{ш} g = 4/3\pi r^3 \rho_{ж} g + 6\pi\eta r v. \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) определяем коэффициент вязкости  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\frac{4}{3}\pi g r^3 (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{6\pi r v} = \frac{2gr^2 (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{9v}. \quad (3.4)$$

Если учесть, что диаметр шара  $d=2r$ , а скорость при равномерном движении определяется как  $v = \frac{L}{t}$ , где  $L$  - расстояние, пройденное шариком за время  $t$ , то выражение для определения коэффициента вязкости (3.4) примет вид:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 g t (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{L}. \quad (3.5)$$

Представим теперь, что роль шариков, равномерно двигающихся в жидкости, играют эритроциты, осаждающиеся в плазме крови. Если выразить из (3.4) скорость движения шарика, то мы получим скорость СОЭ – скорость оседания эритроцитов!

$$v = \frac{2}{9} \frac{g r^2 \cdot (\rho_{э} - \rho_{к})}{\eta_{к}} \quad (3.6)$$

Полученное выражение (3.6) поможет ответить на два очень важных в физиологии вопроса:

**1) Почему в норме у здоровых организмов в зависимости от пола СОЭ отличается?** Действительно, в норме у человека: у мужчин  $v \approx 9 \div 10$  мм/час, а у женщин  $v \approx 14 \div 15$  мм/час. Если посмотреть на выражение (3.6), то можно увидеть, что скорость прямо пропорциональна разности плотностей эритроцита и крови, и обратно пропорциональна вязкости крови. Действительно, у женщин плотность и вязкость крови меньше чем у мужчин за счет другого гормонального состава крови. Т.к. плотность крови у женщин меньше, это значит, что разность плотностей эритроцита и крови у женщин больше и соответственно больше СОЭ. Одновременно, т.к. вязкость крови меньше, то и она влияет на увеличение СОЭ по сравнению с СОЭ у мужчин.

**2) Почему у одного и того же организма в разных физиологических состояниях СОЭ может отличаться?**

Если опять обратиться к выражению (3.6), то следует отметить, что СОЭ прямо пропорциональна квадрату радиуса эритроцита. И хотя радиус самого эритроцита не меняется, но при наличии в организме воспалительного процесса эритроциты «склеиваются в эритроцитные бляшки». Т.е., в крови будут осаждаться не сами эритроциты, а их скопления – конгломераты частиц, имеющие большой радиус и, соответственно, увеличивается СОЭ. Таким образом, определение СОЭ может служить индикатором наличия в организме воспалительного процесса.

Соотношение (3.5), строго говоря, справедливо лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси трубки радиусом  $R$ , в (3.5) необходимо ввести поправку, учитывающую наличие стенок трубки. У стенок исследуемая жидкость покоится, а пограничный слой жидкости около шарика движется вместе с ним. Это приводит к увеличению градиента скорости, и, следо-



вательно, скорость равномерного падения шарика в трубке будет меньше, чем в безграничной среде. Кроме того, формула (3.5) применима к недеформирующимся шарикам. Как показывает теория, для случая падения каплей жидкости учет этих обстоятельств приводит к следующему выражению:

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{gr^2 \rho - \rho_0 \cdot t}{1 + 2,4r/R \cdot l} \quad (3.7)$$

### Порядок выполнения работы

1. Измерительная установка представляет собой цилиндрический сосуд с налитым в него машинным маслом (Рис.3.2). Измерьте температуру масла (температуру воздуха в лаборатории). Плотность машинного масла при комнатной температуре –  $\rho = 910 \text{ кг/м}^3$ .

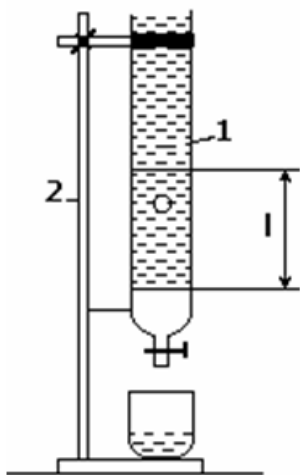


Рис. 3.2

2. Определите путем взвешивания массу пустого стакана ( $m_1$ ).
3. Накапайте в него 50-100 капель воды из пипетки.
4. Определите массу стакана с водой ( $m_2$ ) и найдите массу воды  $m_0 = m_2 - m_1$ .
5. Рассчитайте радиус капли:  $r = \sqrt[3]{\frac{3 m_0}{4 \pi \rho}}$ .
6. Измерьте внутренний радиус трубки  $R$ .
7. Измерьте расстояние  $l$  между метками на трубке.
8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.
9. Из пипетки капните одну каплю воды в трубку.
10. Определите время  $t$  прохождения капель этого расстояния  $l$ .
11. Опыт повторите пять раз.
12. По формуле (3.7) рассчитайте коэффициент вязкости масла. Сравните полученный результат с табличным ( $\eta = 0,113 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ).
13. Найдите среднее значение вязкости и оцените погрешности измерений.
14. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 1.

$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$m_0$ , кг	$r$ , м	$R$ , м	$l$ , м

Таблица 2.

№	$t$ , с	$\eta$ , Па·с	$\langle \eta \rangle$ , Па·с	$\Delta \eta$ , Па·с	$\frac{\Delta \eta}{\langle \eta \rangle} \cdot 100\%$
1					
2					
3					
4					
5					

## Вычисления:

### Вывод:

#### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Запишите и дайте определение формулы Ньютона для силы трения между слоями жидкости или газа.
2. Запишите и дайте определение коэффициента вязкости. Укажите его единицы измерения.
3. Выведите расчетную формулу (3.5) для определения коэффициента вязкости по методу Стокса.
4. Выразите из формулы (3.5) выражение (3.6) для скорости оседания эритроцитов. Объясните: причины различия СОЭ в норме у мужчин и женщин; почему определение СОЭ является диагностическим методом определения воспалительных процессов в организме?

## Лабораторная работа №4

### Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца

**Цель работы:** изучить молекулярные свойства жидкостей, научиться измерять коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца.

**Приборы и принадлежности:** сосуд, стакан, пружина, кольцо, штатив универсальный, весы с разновесами.

### Теория работы

**Жидкость** – это вещество, находящееся в промежуточном состоянии между твердым и газообразным состоянием вещества. Т.е., молекулы жидкости не прикреплены так жестко, как атомы в узлах кристаллической решетки твердых тел, и одновременно, не так свободны, как молекулы в газах, которые находятся в состоянии теплового хаотического движения. Молекулы жидкости участвуют в колебательном и поступательном движениях.

Для жидкости характерны черты:

- расстояние между молекулами очень мало;
- в состоянии покоя каждая молекула находится в строго определенном месте и совершает только колебательное движение, но в определенные моменты времени молекулы жидкости могут меняться местами друг с другом и в этот момент они совершают поступательные движения (молекулы жидкости совершают так называемые «перескоки» из одного положения равновесия в другое);
- у жидкости отсутствует кристаллическая решётка, поэтому для неё характерно свойство - текучесть. Жидкость занимает предоставленный ей объем и принимает форму этого сосуда;
- для жидкости характерны все явления переноса.

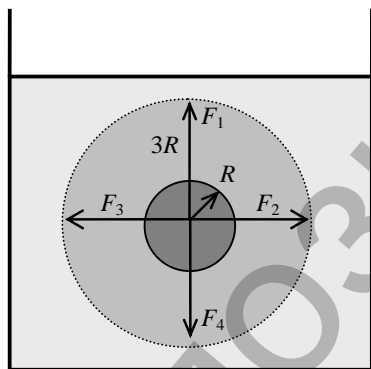


Рис.4.1

Рассмотрим молекулу радиуса  $R$ , находящуюся внутри жидкости (Рис.4.1). Со стороны соседних молекул, находящихся на расстоянии не ближе трех радиусов молекул, на нашу молекулу действуют силы притяжения и отталкивания. Сферическая поверхность (отмеченная пунктирной линией) радиуса  $3R$  называется **сферой молекулярного взаимодействия** – это то наименьшее расстояние, на которое могут приблизиться молекулы в жидкости. Если молекулы начнут приближаться на расстояние меньше  $3R$ , то начнет происходить перекрывание электронных оболочек атомов и «включается» принцип запрета Паули, который разрешает находиться на одной орбитали только двум электронам с противоположным направлением спинов.

Т. к. соседние молекулы расположены симметрично, то сумма всех сил, действующих на молекулу равна нулю. Внутри жидкости молекулы находятся в состоянии равновесия.

Рассмотрим теперь молекулу, находящуюся в поверхностном слое жидкости (Рис.4.2). Спроектируем силы, действующие на нашу молекулу со стороны молекул, лежащих на границе сферы молекулярного взаимодействия, на оси  $OX$  и  $OY$ . Сумма всех проекций сил, действующих на молекулу, вдоль оси  $OX$  будет

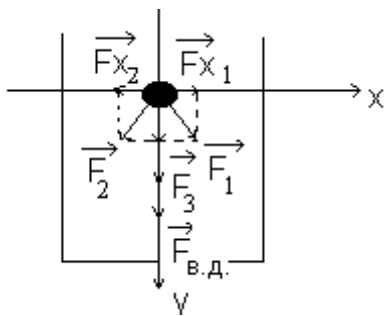


Рис. 4.2

равна нулю -  $\sum F_x = 0$  (потому что, как справа, так и слева от нашей молекулы находятся другие молекулы). Но сумма проекций сил на ось  $OY$  не равна нулю (потому что силы притяжения со стороны молекул жидкости не компенсируются силами притяжения со стороны молекул воздуха). В результате, молекулы, лежащие на поверхности жидкости, действуют на молекулы, лежащие в глубине жидкости с некоторой результирующей силой – силой внутреннего давления, т.е.  $\sum F_y \equiv F_{в.д.}$  -

сила внутреннего давления поверхностного слоя молекул. Если разделить силу внутреннего давления на площадь поверхности жидкости, то получим **внутрен-**

**нее давление:**

$$\frac{F_{в.д.}}{S} = p .$$

**Внутреннее давление** – это давление, оказываемое молекулами поверхностного слоя на молекулы, лежащие в глубине жидкости.

Величина внутреннего давления в жидкости составляет огромные значения: от  $10^4$  до  $10^5$  атм., например, у ртути. Обратите внимание! Это давление не в Паскалях, а в атмосферах! На нас с вами действует давление всего в 1 атмосферу, а в жидкости оно достигает просто невероятных значений - 10 тысяч атмосфер. Молекулы в жидкости просто «спрессованы» под действием такого огромного давления и находятся на таких малых расстояниях – в пределах сферы молекулярного взаимодействия, что ближе приблизится они уже просто не в состоянии, потому что включается принцип запрета Паули. В таком случае возникает один из главных вопросов гидродинамики: **почему реальная жидкость является практически несжимаемой?** Ответ можно сформулировать не совсем физически, но в принципе правильно: **жидкость является несжимаемой, потому что уже сжата под действием огромного внутреннего давления!**

Если создать давление, превышающее внутреннее, то жидкость можно сжимать, но это очень сложная научная и техническая задача. Поэтому, при рассмотрении реальных жидкостей в наших «обычных» бытовых условиях, мы можем их считать несжимаемыми и пользоваться для описания движения уравнениями гидродинамики идеальной (т.е. несжимаемой) жидкости.

Для пытливого ума, естественно, возникает вопрос: а что будет, если удастся создать внешнее давление, превышающее внутреннее? Действительно, такой вопрос стоит перед наукой. Существует Теория металлического водорода! Действительно, если жидкий водород продолжать сжимать, то произойдет перекрытие электронных орбиталей, «лишние» электроны должны будут уйти из электронных облаков, т.е. станут коллективизированными. Между атомами водорода должна «включиться» ковалентная химическая связь (а это очень прочная связь – как, например, в металлах, в кристалле алмаза). Т.е. жидкий водород должен превратиться в металл! Как все красиво! Но почему же до сих пор наука не смогла его получить? А вот почему. Когда мы создаем внешнее давление, то давим каким-нибудь поршнем. Поршень сделан из металла, размеры атомов которого велики. Соответственно, велики и межатомные расстояния. А водород – это первый и самый маленький из атомов в таблице Менделеева. Он, просто «просачивается» между атомами металла! Если удастся найти «чем давить», то, наверное, и удастся получить металлический водород.

Рассмотрим теперь молекулу, лежащую на краю поверхности жидкости (Рис.6.3) и спроектируем все силы на оси  $OX$  и  $OY$ . По-прежнему сумма проекций

сил на ось  $OY$  даст нам силу внутреннего давления, и о ней мы больше говорить не будем. Но вот теперь, сумма проекций сил на ось  $OX$  тоже не равна нулю (по-

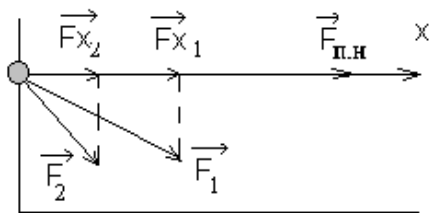


Рис. 4.3

тому что справа от нашей молекулы есть «соседи», притягивающие ее, а слева – нет). Такая результирующая сила  $\sum F_x \equiv F_{п.н.}$  называется **силой поверхностного натяжения** – это сила, с которой молекулы, находящиеся на краю поверхности жидкости, действуют на молекулы, лежащие в глубине поверхности.

Нальем, например, жидкость в сосуд цилиндрической формы и посмотрим на него сверху (Рис.4.4). Молекулы жидкости, лежащие на краю поверхности, будут создавать силу поверхностного натяжения, которая будет стремиться «сжать» поверхность. Таким образом, **сила поверхностного натяжения действует по касательной к поверхности жидкости перпендикулярно контуру, ограничивающему поверхность жидкости.**

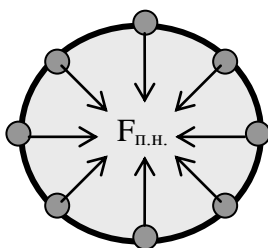


Рис. 4.4

При перемещении молекул из поверхностного слоя вглубь жидкости или, наоборот, из глубины жидкости на поверхность совершается работа. Эта работа тем больше, чем больше различие между силами взаимодействия молекул поверхностного слоя с молекулами жидкости и молекулами граничащей среды.

Рассмотрим жидкость, граничащую со своим паром. Концентрация молекул в воздухе и паре намного меньше, чем в жидкости. Поэтому на молекулы поверхностного слоя жидкости действует сила, направленная внутрь жидкости. Предположим теперь, что площадь поверхности жидкости при изотермическом обратимом процессе увеличилась на величину  $dS$ . Это значит, что некоторое количество молекул перешло из глубины жидкости в поверхностный слой. Следовательно, внешними силами совершена некоторая работа  $\delta A$ , которая прямо пропорциональна количеству молекул, перешедших в поверхностный слой, а значит, и увеличению площади поверхности жидкости на  $dS$ :

$$\delta A = \sigma dS, \quad (4.1)$$

где  $\sigma$  - (греч. «сигма») это коэффициент поверхностного натяжения.

Из (4.1) следует, что коэффициент поверхностного натяжения определяется работой, необходимой для изотермического обратимого увеличения площади поверхности на единицу.

Поскольку работа при изотермическом обратимом процессе равна изменению свободной энергии системы ( $\delta A = dE$ ), то избыточная потенциальная энергия поверхности жидкости является ее свободной энергией  $dE$ . Тогда **коэффициент поверхностного натяжения можно определить как свободную энергию единицы площади поверхности жидкости:**

$$\sigma = \frac{dE}{dS} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{E}{S}. \quad (4.2)$$

В состоянии устойчивого равновесия свободная энергия любой системы минимальна. Следовательно, в равновесии жидкость имеет минимальную площадь поверхности. Это значит, что должны существовать силы, стремящиеся сократить поверхность жидкости. Они направлены по касательной к поверхности жидкости.

Если проволочную рамку, одна из сторон  $AB$  которой подвижна (рис. 4.5), поместить в мыльный раствор и затем вынуть из него, то вся рамка затянется пленкой жидкости. Силы поверхностного натяжения принуждают пленку сокра-

щаться и перемещают перемычку  $AB$ . Чтобы ее удержать в равновесии, необходимо приложить внешнюю силу  $F$ . Так как пленка имеет две поверхности, вдоль каждой из которых действует сила поверхностного натяжения  $F_{н.н}$ , то:

$$F = 2F_{н.н} \quad (4.3)$$

Предположим, что при постоянной температуре бесконечно медленно перемычка  $AB$  перемещается на расстояние  $dx$  (Рис. 4.5). При этом внешняя сила совершает работу:

$$\delta A = 2F_{н.н} dx. \quad (4.4)$$

Эта работа пойдет на увеличение свободной энергии поверхности пленки:

$$\delta A = dE = \sigma dS = \sigma 2L dx, \quad (4.5)$$

где  $L$  – длина перемычки  $AB$  или длина контура, ограничивающего поверхностный слой. Тогда из (4.4) и (4.5) получим, что сила поверхностного натяжения:

$$F_{н.н} = \sigma \cdot L. \quad (4.6)$$

**Сила поверхностного натяжения** прямо пропорциональна длине контура, ограничивающего поверхность жидкости.

Рис 4.5

Из (4.6) выразим коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{F_{н.н.}}{L}. \quad (4.7)$$

В лабораторно-клинической практике по коэффициенту поверхностного натяжения определяют содержание желчных пигментов в моче. При их повышенном содержании коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  резко уменьшается.

**Коэффициент поверхностного натяжения** численно равен силе поверхностного натяжения, с которой молекулы, лежащие на границе, действуют на единицу длины контура, ограничивающего поверхность жидкости.

Размерность коэффициента поверхностного натяжения:  $\sigma = \frac{Н}{м}$ .

### Порядок выполнения работы

В данной работе для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости используется метод отрыва кольца (Рис.4.6).

Исследуемая жидкость находится в сосуде  $A$ . Кольцо  $B$ , изготовленное из материала, хорошо смачиваемого этой жидкостью, подвешено на пружине  $C$ , к нижнему концу которой прикреплена стрелка  $D$ . Удлинение пружины и, следовательно, сила ее натяжения определяются по шкале  $M$ , которая нанесена на штативе.

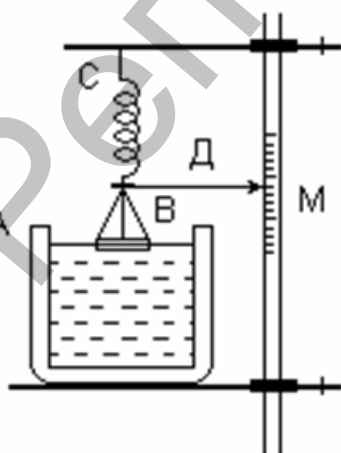


Рис. 4.6

При соприкосновении кольца с поверхностью исследуемой жидкости последняя, смачивая кольцо, поднимается по его стенкам и за счет силы поверхностного натяжения несколько втягивает кольцо внутрь жидкости.

По мере опускания поверхности воды пружина будет растягиваться, и в некоторый момент времени кольцо от поверхности оторвется. В этот момент сила поверхностного натяжения  $F_{н.н.}$ , действующая на всю длину линии разрыва поверхности,

будет равна упругой силе  $F_{упр}$ , возникшей в растянутой пружине, которая определяется по **закону Гука**: сила упругости прямо пропорциональна абсолютной деформации пружины:

$$F_{упр} = k\Delta l, \quad (4.8)$$

где  $\Delta l$  – деформация (растяжение) пружины за счет силы поверхностного натяжения;  $k$  – коэффициент упругости (жесткости) пружины.

В момент отрыва кольца  $F_{н.н.} = F_{упр}$ . (4.9)

Подставляя в условие равновесия (4.9) в момент отрыва кольца силу поверхностного натяжения (4.6) и силу упругости (4.8), получим:

$$\sigma \cdot L = k\Delta l. \quad (4.10)$$

Поверхность жидкости разрывается по линиям двух окружностей (внешней и внутренней окружности кольца). Длина линии разрыва:

$$L = \pi(d_1 + d_2), \quad (4.11)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – внешний и внутренний диаметры кольца.

Подставляя (4.11) в (4.10), найдем:  $\sigma \cdot \pi(d_1 + d_2) = k\Delta l$ , откуда выразим коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{k\Delta l}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (4.12)$$

### Задание №1. Определение коэффициента жесткости пружины

1. Вычислить вес кольца  $P = mg$ , где  $m = 162$  г – масса кольца;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.
2. Заметить по шкале  $M$  на штативе начальное показание стрелки  $D$ .
3. Опустить столик с сосудом  $A$  в нижнее положение, чтобы при растяжении пружины кольцо не касалось поверхности воды.
4. Подвесить кольцо на пружину  $C$ .
5. Вычислить деформацию пружины  $\Delta l$ , как разность показаний стрелки  $D$  в конечном и начальном положении (по шкале  $M$ ).
6. Вычислить коэффициент жесткости пружины из закона Гука по формуле:

$$k = \frac{P}{\Delta l}.$$

### Вычисления к заданию №1:

### Задание №2

#### Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

1. Занесите в таблицу значение коэффициента жесткости пружины, вычисленное в задании №1.
2. Поднимите столик с сосудом  $A$  так, чтобы кольцо начало касаться поверхности жидкости. Заметьте начальное положение стрелки.

3. Медленно опускайте сосуд с жидкостью до момента отрыва кольца, глядя на положение стрелки  $D$ . (Особенно важно точно заметить, куда на шкале  $M$  показывает стрелка в момент отрыва кольца).
4. Вычислите дополнительное удлинение пружины  $\Delta l$ , обусловленное силой поверхностного натяжения.
5. Измерьте с помощью штангенциркуля внешний и внутренний диаметры кольца  $d_1$  и  $d_2$ .
6. По формуле (4.12) вычислите коэффициент поверхностного натяжения жидкости.
7. Опыт повторите не менее 5 раз.
8. Рассчитайте погрешность измерений.
9. Сравните полученный результат с табличным :  $\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 0,073 \text{ Н/м}$ .
10. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

$k =$								
№	$\Delta l$ , м	$d_1$ , м	$d_2$ , м	$\sigma$ , Н/м	$\langle \sigma \rangle$ , Н/м	$\Delta \sigma$ , Н/м	$\langle \Delta \sigma \rangle$ , Н/м	$\varepsilon$ , %
1								
2								
3								
4								
5								
$\sigma =$					$\pm$			

### Вычисления к заданию №2:

#### Вывод:

#### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Что такое жидкость? На основании рис. 4.1 и 4.2 объясните причину возникновения внутреннего давления в жидкости. Что такое внутреннее давление? Почему жидкость является практически не сжимаемой?
2. На основании рис. 4.3 и 4.4 объясните причину возникновения поверхностного натяжения. Что такое сила и коэффициент поверхностного натяжения с точки зрения силы и свободной энергии? Сделайте вывод формулы (4.7).
3. На основании рис.4.6 объясните метод отрыва кольца, сделайте вывод расчетной формулы (4.12).



## Лабораторная работа №5

### Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов

**Цель работы:** изучить причины теплового расширения твердых кристаллических тел, освоить методы определения коэффициента линейного термического расширения металлов. Измерить КЛТР стали и латуни.

**Приборы и принадлежности:** прибор с двумя металлическими трубками, индикатор, электроплитка, парообразователь.

#### Теория работы

Твердое кристаллическое тело состоит из частиц (атомов, ионов, молекул), расположенных упорядоченно друг относительно друга и образующих кристаллическую пространственную решетку. В дальнейшем, для краткости, частицей у нас будет являться атом. Совокупность атомов кристаллической решетки вследствие их взаимодействия друг с другом создает потенциальное поле кристалла. Каждый атом этой кристаллической решетки находится в этом поле и совершает тепловые колебания относительно своего положения равновесия. Такой колеблющийся атом называется осциллятором. Кристалл, состоящий из  $N$  атомов, представляет собой систему  $N$  осцилляторов, взаимодействующих между собой.

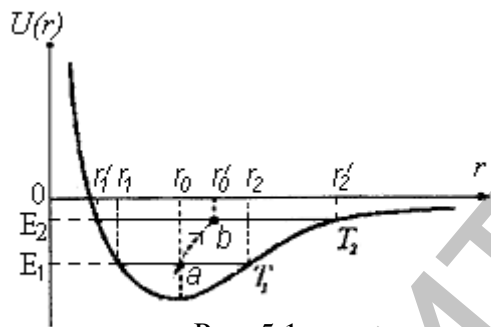


Рис. 5.1

На рис. 5.1. приведена кривая  $U=U(r)$  потенциальной энергии внутрикристаллического поля в кристаллической решетке (жирная линия). Горизонтальная прямая  $a$  соответствует уровню энергии  $E_1$  двух атомов в кристаллической решетке при температуре  $T_1$ . При пересечении графика потенциальной энергии  $U=U(r)$  с энергетическим уровнем  $E_1$  возникают две точки пересечения  $r_1$  и  $r_2$ , которые определяют крайние положения, которые занимают атомы в решетке при своих колебаниях. Середина прямой (точка  $r_0$ ) определяет положение равновесия атомов в решетке при данной температуре  $T_1$ .

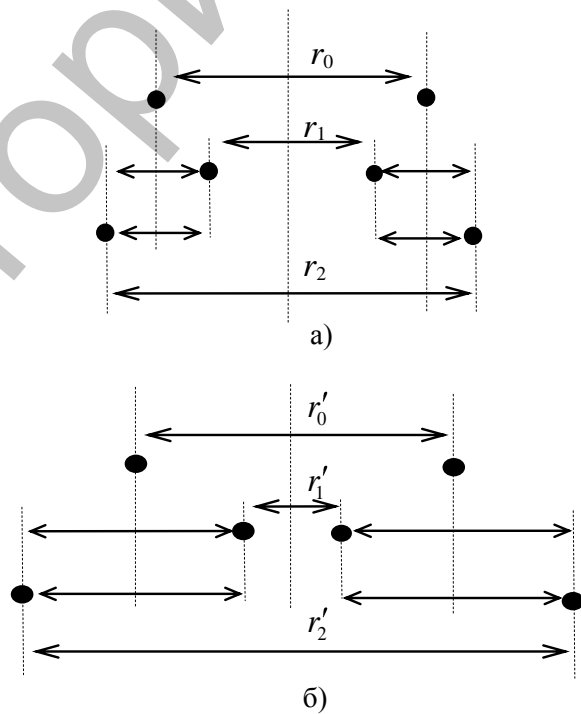


Рис.5.2

В состоянии равновесия два атома (Рис.5.2а) находятся на некотором расстоянии  $r_0$ . При тепловых колебаниях атомы сближаются до минимального расстояния  $r_1$  и «разлетаются» до максимального расстояния  $r_2$ .

При повышении температуры атомы переходят на более высокий энерге-

тический уровень  $E_2$ , определяемый прямой  $b$  (Рис.5.1). При пересечении графика потенциальной энергии  $U=U(r)$  с новым энергетическим уровнем  $E_2$  возникают новые две точки пересечения  $r'_1$  и  $r'_2$ , которые определяют новые крайние положения, которые занимают атомы в решетке при тепловых колебаниях. Ввиду асимметрии графика потенциальной энергии  $U(r)$  центр прямой  $b$  смещен относительно центра прямой  $a$  вправо. Середина прямой (точка  $r'_0$ ) определяет новое положение равновесия атомов в решетке при температуре  $T_2$ . Это означает **смещение положения равновесия атомов**: *межатомное расстояние увеличивается, что и обуславливает расширение кристалла при нагревании.*

На рис.10.2.б показано, что атомы при температуре  $T_2$  находятся на некотором расстоянии  $r'_0 > r_0$ . При этом амплитуды их тепловых колебаний также увеличиваются и атомы могут сближаться до меньших расстояний  $r'_1$ , и «разлетаться» на большие расстояния  $r'_2$ .

Таким образом, при нагревании твердых кристаллических тел возникают два эффекта:

- увеличение линейных размеров тела за счет увеличения межатомных расстояний;
- увеличение амплитуды тепловых колебаний атомов.

Различные твердые кристаллические тела по-разному изменяют свои линейные размеры при нагревании. Для характеристики способности тел изменять свои линейные размеры при нагревании используется **коэффициент линейного термического расширения  $\alpha$**  (греч. «альфа»), который рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{r_b - r_a}{r_a (T_2 - T_1)} \quad (5.1)$$

Вследствие анизотропии кристаллов, коэффициент линейного термического расширения  $\alpha$  может быть различным в разных направлениях. Это означает, что если из данного кристалла выточить шар, то после его нагревания он потеряет сферическую форму. В самом общем случае такой шар при нагревании превращается в трехосный эллипсоид, оси которого связаны с кристаллографическими осями кристалла.

Коэффициенты линейного термического расширения практически остаются постоянными, если интервалы температур, в которых они измеряются, малы, а сами температуры высокие. Вообще же, коэффициенты термического расширения зависят от температуры и при том так же, как и теплоемкость. Но *отношение коэффициента линейного термического расширения к молярной теплоемкости твердого тела для данного вещества есть величина постоянная, не зависящая от температуры* - это **закон Грюнайзена**:

$$\Gamma = \frac{\alpha}{C_{\mu}} = const. \quad (5.2)$$

### Порядок выполнения работы

В данной работе для определения коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов используется установка, схема которой приведена на рис. 5.3.

Прибор предназначен для лабораторных работ по определению с помощью индикатора деформации КЛТР твердых тел в виде трубок. Он состоит из пластмассовой подставки 1, стойки 2 с зажимным винтом 3, стойки 4 с втулкой 5, в ко-

торую вставляется индикатор 6, закрепляемый винтом 7, двух металлических трубок (стальной и латунной) 8, на которых закреплена пластина 9.

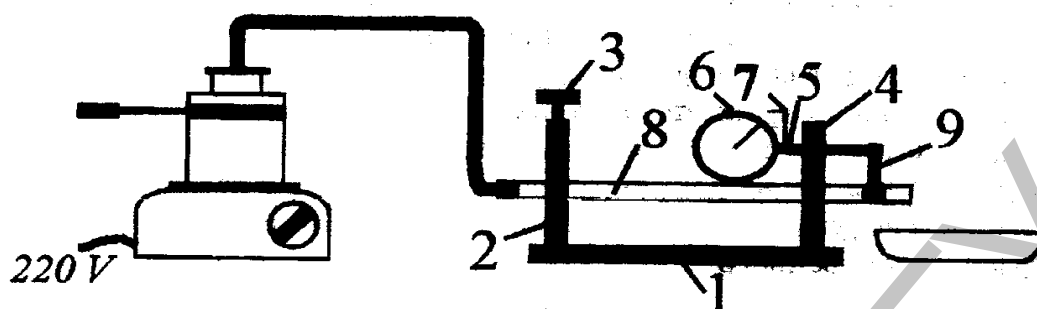


Рисунок 5.3. Схема установки для измерения КЛТР металлических трубок.

1. Вставить исследуемую трубку (стальную или латунную) в стойки, сначала 4, а затем 3, через имеющиеся в них отверстия до упора во втулку индикатора 5. Вставлять трубку до тех пор, пока расстояние между пластиной 9 трубки и стойкой 4 не станет равным приблизительно 5 мм. Зажимным винтом 3 зафиксировать трубку.
2. Совместить нулевую отметку шкалы индикатора 6 со стрелкой путем поворота кольца индикатора.
3. Измерить линейкой длину рабочего участка трубки  $L$  от центра винта 3 до ближайшей к нему стороны пластины 9.
4. Определить комнатную температуру.
5. Еще раз проверив установку индикатора на «ноль» налить воду в парообразователь и соединить его шлангом с трубкой. Поставить парообразователь на электроплитку и включить ее. Пар, образовавшийся при кипении воды в парообразователе, проходя через металлическую трубку, нагревает ее.

**ВНИМАНИЕ:** при проведении опыта особую опасность представляет горячий водяной пар, образующийся в парообразователе, и сама трубка, которая нагревается до температуры кипения воды, т.е. до 100 °С.

**ВО ИЗБЕЖАНИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ОЖОГА, ЗАПРЕЩАЕТСЯ:** прикасаться голыми руками к плитке, парообразователю, разогретой трубке; открывать крышку парообразователя при кипении в нем воды.

6. Производить нагрев трубки до тех пор, пока изменяются показания индикатора. При установившемся показании индикатора записать значение удлинения  $\Delta L$  рабочей части трубки (цена одного малого деления 0,01 мм).
7. Провести три измерения величины  $\Delta L$  для каждой трубки. Для ускорения работы рекомендуется проводить эксперимент, чередуя различные трубки (одна участвует в опыте, другая тем временем охлаждается).
8. Определить КЛТР из соотношения:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(T-T_k)}, \quad (5.6)$$

где  $\Delta L$  – удлинение рабочей части трубки при нагревании,  $L$  – длина рабочей части трубки при комнатной температуре,  $T$  – конечная температура, равная 373К,  $T_k$  – начальная комнатная температура.

9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.
10. Найти абсолютную и относительную погрешности в определении  $\alpha$ .

11. Сопоставить результаты данной работы с данными таблицы 2 для КЛТР различных металлов.

Таблица 1

№ пп.	$L$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\alpha$ , $K^{-1}$	$\langle \alpha \rangle$ , $K^{-1}$	$\Delta \alpha$ , $K^{-1}$	$\langle \Delta \alpha \rangle$ , $K^{-1}$	$\alpha = \langle \alpha \rangle \pm \langle \Delta \alpha \rangle$ , $K^{-1}$	$\varepsilon$ , %
Сталь								
1								
2								
3								
Латунь								
1								
2								
3								

Таблица 2. Табличные значения КЛТР некоторых металлов

Вещество	$t$ , °C	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , $K^{-1}$
Алюминий	0-100	23,8
Железо	0-100	11,4
Сталь (1,5% C)	0-100	10,5
Латунь (62% Cu, 38% Zn)	10-16	18,9
Медь	18	16,7

**Вычисления:**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:**

1. Нарисуйте рис.5.1 и 5.2, и объясните, что происходит с атомами кристаллической решетки при ее нагревании.
2. Запишите формулу КЛТР и объясните смысл величин, входящих в нее.
3. Запишите и сформулируйте закон Грюнайзена.

**Лабораторная работа № 6**  
**Изучение электроизмерительных приборов.**  
**Проверка закона Ома для участка цепи**

**Цель работы:** изучить основные характеристики электрического тока и законы Ома, классификацию электроизмерительных приборов, их устройства, принцип работы, технические характеристики, правила отсчета и обработки результатов измерений.

**Приборы и принадлежности:** амперметры, вольтметры, многодиапазонные и комбинированные приборы разных систем и классов точности, источник тока, магазин сопротивлений.

**Теория работы**

**Постоянный электрический ток** – это упорядоченное движение заряженных частиц. В металлах – электронов, в электролитах – ионов, в газах – электронов и ионов. Основными характеристиками постоянного тока являются:

**Сила тока** – заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t} . \quad (6.1)$$

Размерность силы тока:  $I = \frac{q}{t} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$  (Ампер).

**Плотность тока** – сила тока, проходящего в проводнике единичного сечения:

$$i = \frac{I}{S} . \quad (6.2)$$

Размерность плотности тока:  $i = \frac{I}{S} = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$ .

Когда мы помещаем проводник в постоянное электрическое поле с разностью потенциалов  $\Delta\varphi$ , то со стороны электрического поля на заряды действует сила Кулона, которая совершает работу по перемещению зарядов и в проводнике возникает постоянный электрический ток. Т.е., постоянный ток – это электрический ток одного направления. Разность потенциалов в теории электрического тока называется по-другому – электрическое напряжение (или просто – напряжение) и обозначается  $\Delta\varphi = U$ . Размерность напряжения такая же, как и размерность разности потенциалов:  $\Delta\varphi = U = \text{В}$  (Вольт).

Пусть электрический проводник – это металл. По своей химической структуре металл имеет металлическую решетку, в узлах которой находятся атомные остатки – положительные ионы, а электроны внешних орбиталей становятся коллективизированными. В металле, где атомные остатки связаны сильной металлической связью, атомные остатки не могут совершать поступательное хаотическое движение, но они находятся в состоянии непрерывного теплового колебательного движения. Если к металлу приложить внешнее электрическое поле, то, как было отмечено выше, электрическое поле начнет перемещать свободные коллективизированные электроны, которые будут двигаться по металлической решетке, испытывая постоянные соударения с атомными остатками, которые совершают тепловые колебания. Т.е., сам проводник оказывает сопротивление проходящему через него электрическому току.

Способность проводника препятствовать прохождению через него электрического тока называется **электрическим сопротивлением проводника** (или

просто – **сопротивлением**) –  $R$ . Таким образом, сила тока в проводнике увеличивается с увеличением внешнего электрического поля, т.е. напряжения, и уменьшается при увеличении сопротивления самого проводника, т.е. способности проводника препятствовать току. Эти два фактора, от которых зависит сила тока в проводнике, объединяются **законом Ома для участка цепи** (для участка проводника) (Рис.6.1):

$$I = \frac{U}{R} \quad (6.3)$$

*сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.*

Из закона Ома определяется размерность сопротивления:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{В}{А} = \text{Ом}.$$

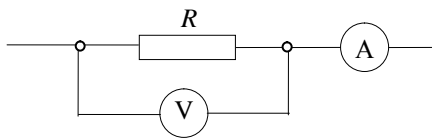


Рис.6.1

Величина, обратная сопротивлению проводника, называется **электропроводностью проводника** (или просто **электропроводностью**):

$$K = \frac{1}{R}. \quad (6.4)$$

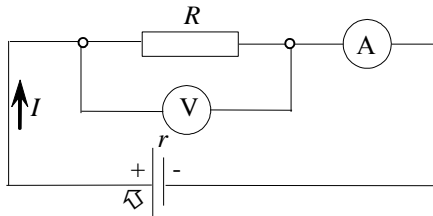


Рис.6.2

Размерность электропроводности:

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См (Сименс)}.$$

Если участок проводника сопротивлением  $R$  подключен к источнику постоянного тока  $J$  (рис. 6.2), имеющему внутреннее сопротивление  $r$ , то в цепи возникнет постоянный ток, за направление которого принимается направление от положительного полюса источника тока к его отрицательному полюсу. Величина силы тока определяется **законом Ома для полной цепи, содержащей источник тока**:

$$I = \frac{J}{R + r} \quad (6.5)$$

*сила тока в цепи содержащей источник тока прямо пропорциональна электродвижущей силе (ЭДС –  $J$ ) источника тока и обратно пропорциональна сумме внешнего сопротивления  $R$  (участка цепи) и внутреннего сопротивления  $r$  источника тока.*

В данной работе необходимо изучить основные характеристики постоянного электрического тока, классификацию электроизмерительных приборов для их определения, научиться их определять и использовать для нахождения сопротивления.

### 1. Классификация электроизмерительных приборов

Существует следующая классификация измерительных приборов: метрологическая классификация, классификация по роду измеряемой величины, по принципу действия в зависимости от системы, классификация приборов и вспомогательных частей по степени точности, по устойчивости к механическим воздействиям, по степени защищенности корпусов, по габаритным размерам корпусов, по способу защиты от внешних магнитных или электростатических полей, по характеру применения, по способу представления отсчета.

**По роду измеряемой величины** приборы делятся на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики электрической энергии, частотомеры, кулонометры, генриметры, фарадометры, веберометры, гальванометры и др.

**По принципу действия** – на системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную, электростатическую, выпрямительную, термоэлектрическую, вибрационную, тепловую и электронную.

**По степени точности** – на следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

**Класс точности** характеризуется относительной приведенной погрешностью, равной отношению абсолютной погрешности прибора к максимальному значению шкалы прибора.

Таким образом, класс точности прибора: 
$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{\max}} 100\% . \quad (6.6)$$

Отсюда вытекает, что абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta A = \frac{\varepsilon A_{\max}}{100\%} . \quad (6.7)$$

Однако в теории погрешностей доказывается более строгая формула абсолютной погрешности:

$$\Delta A = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon A_{\max}}{100\%} . \quad (6.8)$$

Относительная погрешность измерений: 
$$\beta = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon A_{\max}}{A_{\text{изм}}} 100\% . \quad (6.9)$$

С учетом (12.8) выражение (12.9) примет вид: 
$$\beta = \frac{\Delta A}{A_{\text{изм}}} 100\% , \quad (6.10)$$

где  $A_{\text{изм}}$  – это измеренное с помощью прибора значение физической величины (силы тока, напряжения и др.), т.е., это конкретные показания приборов.

Выражения (6.8), (6.10) используются для вычисления абсолютной и относительной погрешностей измерений по классу точности прибора  $\varepsilon$ , который указан на шкале прибора. Абсолютная погрешность для выбранной шкалы прибора величина постоянная, а относительная погрешность измерений – величина переменная и всегда больше класса точности прибора.

Соответствующую классификацию по степени точности имеют и вспомогательные части прибора: шунты, дополнительные сопротивления и делители напряжения, которые прилагаются к некоторым приборам.

## 2. Физические основы работы отдельных систем измерительных приборов

### Приборы магнитоэлектрической системы

Принцип работы этой системы основан на взаимодействии магнитного поля проводника с током с магнитным полем постоянного магнита (Рис.6.3). Подвижными могут быть как проводник с током (прибор с подвижной рамкой), так и постоянный магнит (прибор с подвижным магнитом). При взаимодействии магнитного поля проводника с током (1) и магнитного поля постоянного магнита прибора (2) рамка прибора, к которой прикреплена стрелка прибора (3), поворачивается на определенный угол. (4) – это противодействующие, возвращающие спиральные пружины. Таким образом, угол поворота рамки приборов магнитоэлектрической системы пропорционален величине тока в ней, поэтому шкала таких приборов равномерная.

Приборы этой системы используются только в цепях постоянного тока. Для использования в цепях переменного тока они обеспечиваются дополнительными выпрямителями (обычно полупроводниковыми).

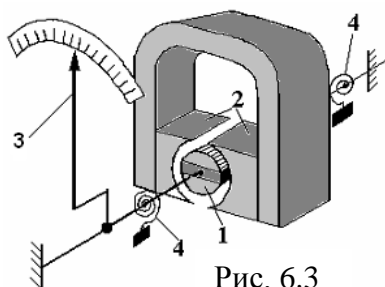


Рис. 6.3

### Приборы электромагнитной системы

Измерительный механизм этой системы приборов складывается из неподвижной катушки, легкого ферромагнитного сердечника, закрепленного на оси вместе со стрелкой. Принцип действия приборов такой системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки с магнитным полем индукционных токов сердечника. Шкала таких приборов квадратичная: сильно сжатая в начале и растянутая в конце. Независимо от направления тока в катушке прибора сердечник всегда втягивается внутрь неё. Поэтому приборы этой системы используются для измерения как в цепях постоянного, так и переменного тока.

### Приборы электродинамической системы

Измерительный механизм этой системы приборов состоит из подвижной и неподвижной катушки, на оси которой закреплена стрелка прибора. Принцип работы приборов этой системы основан на взаимодействии магнитных полей токов подвижной и неподвижной катушек. Шкала таких приборов квадратичная. Приборы электродинамической системы используются для измерения в цепях постоянного и переменного тока. Преимуществами этой системы приборов являются: возможность их использования в цепях как постоянного, так и переменного тока, высокая точность. Недостатками: неравномерность шкалы, чувствительность к перегрузкам и к внешним магнитным полям.

### 3. Обозначения технических данных приборов

В целях удобства пользования приборами обычно на корпусе или на шкале наносятся в виде условных обозначений следующие их технические характеристики, условия эксплуатации и конструктивные данные:

#### 1) Название прибора.

Обозначение	Название. Предназначен для измерения	Разновидности		
		Обозначение	Название	Диапазон значений
$A$	Амперметр. Для измерения силы тока	кА mA $\mu A$ или мкА	килоамперметр миллиамперметр микроамперметр	$10^3 A$ $10^{-3} A$ $10^{-6} A$
$V$	Вольтметр. Для измерения напряжения	кV mV	киловольтметр милливольтметр	$10^3 B$ $10^{-3} B$
$W$	Ваттметр. Для измерения мощности	MW кW	мегаваттметр киловаттметр	$10^6 Bt$ $10^3 Bt$
$\Omega$	Омметр. Для измерения сопротивления	M $\Omega$	мегаомметр	$10^6 Om$
$Wb$	Веберметр Для измерения индукции маг- нитного поля	mWb	милливеберметр	$10^{-3} Bб$
И другие.				



## 2) Система прибора.

Тип системы электроизмерительного прибора		Значок системы на шкале прибора	
Магнито-электрическая система прибора	С механической противодействующей силой		
	Без механической противодействующей силы		
	Термоэлектрические приборы	С контактным преобразователем	
		С изолированным преобразователем	
	Электронно-ламповые приборы		
	Фотоэлектрические приборы		
Электромагнитная система прибора	С механической противодействующей силой		
	Без механической противодействующей силы		
Электродинамическая система прибора	Без стали	Без механической противодействующей силы	
		С механической противодействующей силой	
	Ферродинамическая система	С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
	Индукционная система	С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
Электростатическая система прибора			
Тепловая система прибора			
Вибрационная (язычковая) система прибора			

3) **Класс точности:** 0,05; 1,0; 1,5; 2,0 или другие.

4) **Рабочее положение:**

а) горизонтальное: или

б) вертикальное: или

г) наклоненный под углом:  $\angle 60^\circ$ .

5) **Измерительная цепь изолирована** от корпуса и изоляция испытана под напряжением (в киловольтах): или 2 кВ.

6) **Условия работы** при соответствующих температурах и влажности обозначаются буквами:


A – нормальная работа прибора при температуре окружающего воздуха  $+20^\circ - +35^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха 80%.

**Б** – соответственно, при температуре  $-20^{\circ} - +50^{\circ}\text{C}$  и влажности 80%.

**В** – соответственно, при температуре  $-40^{\circ} - +60^{\circ}\text{C}$  и влажности 80%.

7) **Предназначение прибора** для цепи только постоянного тока ( - ); только переменного тока ( ~ ); для цепи как постоянного, так и переменного тока ( ≈ ).

8) **Наличие защиты:** □ - от внешнего магнитного поля; ▤ - от внешнего электростатического поля; АСТА – астатическая защита.

9)  – **знак Внимание**. Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации прибора.

Кроме указанных обозначений, на шкале приборов имеются обозначения границ измерения приборов, счета фаз, границ допустимой частоты переменного тока, номер стандарта для данной группы приборов и другие обозначения. Иногда вместо внутреннего сопротивления для амперметров указывается падение напряжения, а для вольтметров – величина потребляемого тока, которые соответствуют максимальному отклонению стрелки. Величину внутреннего сопротивления в этом случае можно подсчитать по закону Ома, используют границу измерения прибора.

Одной из главных технических характеристик прибора является его **чувствительность** – величина, характеризующая число делений шкалы прибора, которое приходится на единицу измеряемой величины при данной границе измерения:

$$S = \frac{N_{\max}}{A_{\max}}, \quad (6.11)$$

где  $N_{\max}$  – максимальное количество делений шкалы прибора;  $A_{\max}$  – граница измерения, которая указана на приборе.

Величина, обратная чувствительности, называется ценой деления шкалы прибора:

$$C = \frac{1}{S} = \frac{A_{\max}}{N_{\max}}. \quad (6.12)$$

**Цена деления** характеризует значение измеряемой величины, которое приходится на одно деление шкалы (для данной границы измерения).

Зная цену деления и количество делений шкалы  $N$ , на которое указывает стрелка прибора можно определить значение величины, измеренной прибором:

$$A = C \cdot N. \quad (6.13)$$

## Порядок выполнения работы

### Задание №1. Проведение классификации электроизмерительных приборов

1. Прочитать символы на шкалах приборов. Выяснить технические возможности приборов.
2. Выполнить классификацию приборов:
  - 2.1. по роду измеряемой величины;
  - 2.2. по роду тока;
  - 2.3. по принципу действия;
  - 2.4. по классу точности
3. По формулам (6.11) и (6.12) вычислить чувствительность и цену деления приборов для каждой границы измерения.
4. Результаты классификации и расчетов занести в таблицу 1.

Таблица 1. Классификация электроизмерительных приборов

Усл. обозн	Название прибора, расшифровка условных обозначений	Граница измерения	Цена деления $C$	Чувствительность $S$
Прибор: _____				
Прибор: _____				

**Задание №2. Вычисление показаний приборов и оценка погрешностей прямых измерений**

1. Собрать электрическую схему по рис.6.2.
2. Записать в таблицу 2 значение используемой границы измерения, установленной на амперметре и вольтметре.
3. Занести в таблицу 2 значения цены деления  $C$  для данной границы измерения, рассчитанные в таблице 1.
4. Установить на магазине сопротивлений  $R_m$  определенное значение сопротивления. Занести значение сопротивления в таблицу 3.
5. Записать в таблицу 2 количество делений шкалы  $N$ , на которое указывает стрелка амперметра и вольтметра.
6. Вычислить по формуле (6.13) показания приборов  $A_{изм}$ : на амперметре – силы тока; на вольтметре – напряжения.
7. Сделать измерения силы тока и напряжения при трех различных значениях сопротивления на магазине сопротивлений.
8. Оценить погрешность прямых измерений исходя из класса приборов:
  - 8.1. абсолютную погрешность по формуле (6.8);
  - 8.2. относительную погрешность по формуле (6.10).
9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2. Вычисление показаний приборов. Оценка погрешностей измерений.

Измеряемая величина	Используемая граница	Цена деления $C$	Число делений шкалы $N$	Показания прибора $A_{изм}$	Абсолютная погрешность $\Delta A$	Относительная погрешность $\beta, \%$
Прибор: _____						
Прибор: _____						

Вычисления к таблице №2:

**Задание №3. Проверка закона Ома для участка цепи**

1. Занести в таблицу 3 значения измеренных величин силы тока и напряжения из таблицы 2.
2. Вычислить значения сопротивления и электропроводности по формулам (6.3) и (6.4) соответственно.
3. Результаты вычислений занести в таблицу 3.

Таблица 3. Проверка закона Ома для участка цепи.

№ опыта	$R_m$ , Ом	$I$ , А	$U$ , В	$R$ , Ом	$K$ , См

- Сравнить полученные в результате вычислений значения сопротивления со значениями сопротивления магазина сопротивлений. Сделать вывод о закономерности применения закона Ома для участка цепи.
- Сравните таблицы 2 и 3 и сделайте вывод о точности вычисления сопротивления. При каких границах измерений точность наибольшая? Какая при этом чувствительность приборов?

**Выводы:**

**Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы:**

- Дайте определение электрического тока. Запишите формулы и дайте определения силы, плотности тока, их размерностей.
- Нарисуйте схемы, запишите и сформулируйте законы Ома для участка цепи и для полной цепи, содержащей источник тока.
- Объясните причины возникновения электрического сопротивления в металлических проводниках. На основании закона Ома для участка цепи укажите размерность сопротивления. Что такое электропроводность? Её размерность?
- Запишите и объясните формулы для нахождения абсолютной и относительной погрешности приборных измерений по классу точности приборов.
- Дайте классификацию электроизмерительных приборов по принципу действия, по роду тока.
- Запишите формулы и объясните, что такое и как определить чувствительность, цену деления прибора. Объясните, как, зная цену деления прибора, узнать показания прибора.
- При каких значениях цены деления и чувствительности точность измерения будет наибольшей?

## Лабораторная работа №7

### Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току

**Цель работы:** изучить механизм прохождения переменного тока через ткани живого организма; электрические характеристики живых тканей, научиться определять импеданс и электропроводность живых тканей.

**Приборы и принадлежности:** микроамперметр переменного тока, два свинцовых электрода, НЧ генератор электрических колебаний, ключ, провода.

### Теория работы

Наиболее полную информацию о биологическом объекте можно получить при изучении его электрических свойств на переменном токе. Биологическому объекту при прохождении через него переменного тока присущи активные и пассивные электрические свойства (сопротивление и емкость).

*Структурная единица биологической ткани - клетка с электрической точкой зрения представляет собой сферический конденсатор определенной емкости. Почему?*

**Электрический конденсатор** – это система, состоящая из двух пластин – электрических проводников, между которыми находится диэлектрик. Такая система – **конденсатор** способна накапливать электрический заряд. Характеристикой способности конденсатора накапливать электрический заряд является **электрическая емкость конденсатора** (или просто емкость конденсатора):

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} \quad (7.1)$$

**Емкость конденсатора** численно равна заряду на пластине конденсатора, если разность потенциалов между ними равна 1 В.

Размерность емкости: 
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф (Фарад)} .$$

Конденсатор в цепи переменного тока обладает **емкостным сопротивлением**:

$$R_C = \frac{1}{\omega C} \quad (7.2)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  - круговая, а  $\nu$  - линейная частота переменного тока.

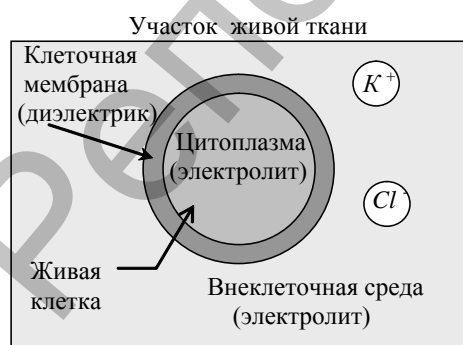


Рис.7.1

Живая клетка по своим электрическим свойствам очень похожа на электрический конденсатор (Рис.7.1). Внеклеточная среда и цитоплазма представляют собой растворы электролитов, в которых носителями заряда являются ионы калия, хлора, кальция и т.д. Т.е., **цитоплазма и внеклеточная среда – это проводники**. Цитоплазматическая клеточная мембрана состоит из белков и липидов, которые по своим электрическим свойствам представляют диэлектрики, не проводящие электрический ток. Т.е., **клеточная мембрана – это диэлектрик**. Поскольку мембрана отделяет цитоплазму от внеклеточной среды, то, подобно конденсатору: **проводник – диэлектрик – проводник** участок живой ткани: **внеклеточная среда –**

**клеточная мембрана – цитоплазма** также является конденсатором. Учитывая, что клетка имеет пространственную структуру, то **клетка – это сферический конденсатор**. Т.е., живая клетка это конденсатор, накапливающий электрический заряд и, соответственно, электрическую энергию.

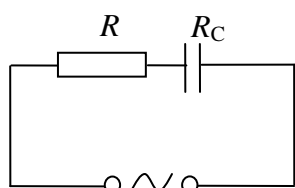


Рис. 7.2

Омывающие клетку жидкости являются электролитами, обладающими активным сопротивлением. Таким образом, биологические ткани обладают как активным, так и емкостным сопротивлениями.

Эквивалентная электрическая схема поверхностных тканей живого организма (кожных покровов) представлена на рис.7.2 – это последовательное соединение активного сопротивления межклеточной жидкости и емкостного сопротивления живых клеток.

**Полное (суммарное) сопротивление ткани переменному току называется импедансом - z**. При последовательном соединении активного и емкостного сопротивления импеданс определяется по формуле:

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}, \quad (7.3)$$

где  $R$  - активное сопротивление электролита,  $C$  - емкость клетки. Или:

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi\nu \cdot C}\right)^2}. \quad (7.4)$$

Из формулы (7.4) видно, что величина импеданса зависит не только от  $R$  и  $C$ , но и от частоты переменного тока  $\nu$ . **Зависимость импеданса от частоты переменного тока называется дисперсией импеданса**.

Экспериментально, зная напряжение и силу тока в цепи, импеданс определяется по **закону Ома для цепи переменного тока**:

$$z = \frac{U_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}}, \quad (7.5)$$

где  $U_{\text{эфф}}$ ,  $I_{\text{эфф}}$  - эффективное значение напряжения и силы переменного тока.

**Электропроводность – величина, обратная сопротивлению среды, через которую проходит электрический ток.**

$$K = \frac{1}{z}. \quad (7.6)$$

Размерность электропроводности:  $K = \frac{1}{z} = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См (Сименс)}$ .

Поскольку электропроводность ткани определяется её импедансом, то электропроводность биологического объекта также зависит от частоты переменного тока. **Зависимость электропроводности от частоты переменного тока называется дисперсией электропроводности**.

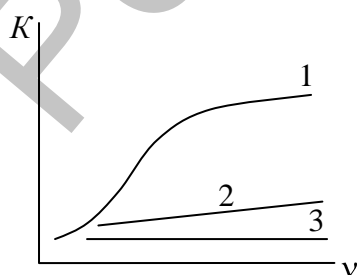


Рис. 7.3

В медицинской диагностической практике используется **метод исследования дисперсии электропроводности живых тканей, который называется реография**. Данный метод применяется при изучении процессов, происходящих при действии повреждающих факторов, при возникновении различных патологий и т.д. В результате исследования дисперсии электропроводности тканей организма могут быть получены кривые, показанные на рис.7.3. Кривая (1) соответствует нормально функциони-

рующей живой ткани. Кривая (2) характеризует существующие в ткани патологические изменения: у кривой очень малый наклон, т.е. слабая дисперсия. Это связано с тем, что дисперсия электропроводности зависит от дисперсии емкостного сопротивления ткани. Но емкостным сопротивлением обладают живые клетки. Емкостное сопротивление клеток зависит от состояния диэлектрика – клеточных мембран. Поэтому, уменьшение наклона графика дисперсии электропроводности свидетельствует об изменениях в живых тканях на уровне мембран клеток. Кривая (3), для которой отсутствует дисперсия (т.е. на любой частоте переменного тока электропроводность одинакова) характеризует мертвую ткань. В этом случае полностью отсутствует емкостное сопротивление клеток (клетка не жизнеспособна) и электропроводность ткани характеризуется только активным сопротивлением межклеточной жидкости.

Удобства данного метода заключаются в том, что прикладываемое напряжение (до 50 мВ) не вносит существенных изменений в физико-химические процессы в живых тканях и не повреждает их.

В данной работе исследуется дисперсия электропроводности тканей живого организма. Электропроводность тканей определяется методом амперметра и вольтметра.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему по рис.7.4, где П - потенциометр, З.Г. - звуковой генератор, V и мкА - вольтметр и микроамперметр переменного тока соответственно, Э - электроды. Установить напряжение 5 В. Положить два пальца руки на электроды.
2. Изменяя частоту переменного тока от 200 до 1000 Гц через 100 Гц, измерять силу тока в цепи по микроамперметру. Повторить измерения при напряжении 7 В.
3. Вычислить по формуле (7.5) импеданс, а по формуле (7.6) электропроводность ткани. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

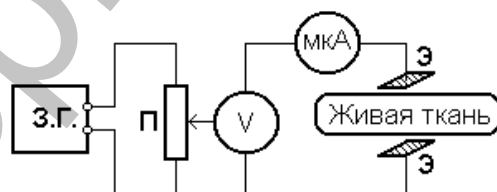


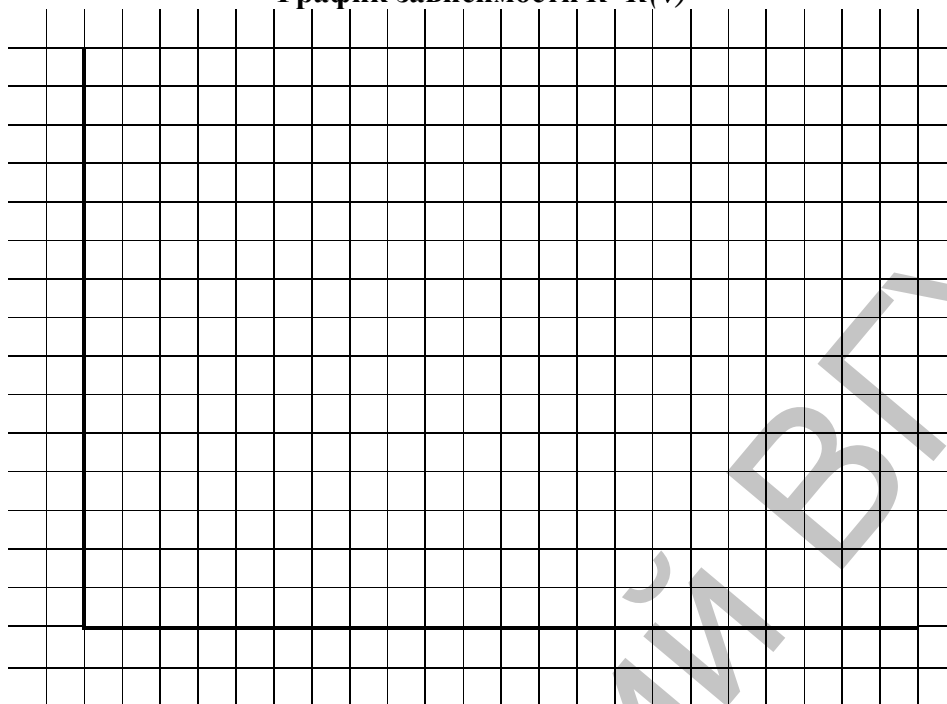
Рис. 7.4

№	$\nu$ , Гц	$I_{эфф.}, A$		$z, Ом$		$K, См$	
		$U=5 В$	$U=7 В$	$U=5 В$	$U=7 В$	$U=5 В$	$U=7 В$
2	200						
3	300						
4	400						
5	500						
6	600						
7	700						
8	800						
9	900						
10	1000						

4. Построить графики зависимости электропроводности от частоты  $K=K(\nu)$  при одном и том же значении напряжения (два графика в одной системе координат).
5. Сделать вывод о зависимости электропроводности ткани от частоты переменного тока.



**График зависимости  $K=K(\nu)$**



**Вывод:**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:**

1. Что такое электрический конденсатор? Запишите и сформулируйте определение емкости конденсатора. Запишите формулу емкостного сопротивления конденсатора в цепи переменного тока.
2. Запишите формулу импеданса для живой ткани и объясните природу происхождения активного и емкостного сопротивления в живых тканях. Какие структурные элементы живой ткани обладают, какими видами сопротивлений?
3. Запишите формулу и дайте определение электропроводности.
4. Что называется дисперсией импеданса, электропроводности? Что такое реография? Почему изучение дисперсии электропроводности живых тканей является диагностическим методом в биологии и медицине?
5. Запишите формулу закона Ома для цепи переменного тока и дайте его определение.
6. Нарисуйте схему электрической цепи для изучения дисперсии электропроводности методом амперметра-вольтметра. Объясните методику опыта.
7. На основании полученных результатов и сравнения с рис.7.3, проанализируйте состояние участка живой ткани, на котором изучалась дисперсия электропроводности в данной работе.

## Лабораторная работа №8

### Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Изучение принципа суперпозиции магнитных полей

**Цель работы:** изучить основные характеристики постоянного магнитного поля, магнитного поля Земли; научиться определять горизонтальную составляющую магнитного поля Земли с помощью тангенс - гальванометра.

**Приборы и принадлежности:** источник постоянного тока, миллиамперметр, тангенс – гальванометр, двухполюсный ключ, провода.

#### Теория работы

**Магнитное поле** – это особый вид материи, с помощью которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрическими зарядами или проводниками с током.

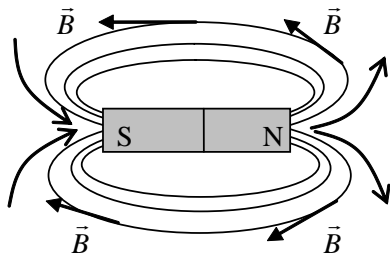


Рис.8.1

Источниками магнитного поля могут быть: постоянные магниты (Рис.8.1), проводники с током или движущиеся электрические заряды. Графически магнитное поле изображается с помощью силовых линий магнитного поля. За направление силовых линий – линий индукции магнитного поля условились считать направление от северного (N) к южному (S) магнитному полюсу. В отличие от электрического магнитное

поле нигде не начинается и нигде не заканчивается, т.е. линии индукции магнитного поля замкнуты, поэтому магнитное поле полностью пронизывает все вещество, например, постоянный магнит (Рис.8.1). Т.к. магнитных зарядов в природе не существует, то деление на северный и южный магнитный полюс чисто условное. Если «разрезать» постоянный магнит по линии, разделяющей S и N на рис.8.1, то каждый «кусочек» магнита опять разобьется на северный и южный магнитный полюс.

Если в постоянное магнитное поле внести проводник с постоянным током, то со стороны магнитного поля на него будет действовать сила Ампера – это сила, с которой магнитное поле действует на внесенный в него проводник с током. Ее численное значение рассчитывают по закону Ампера: *сила Ампера прямо пропорциональна вектору индукции магнитного поля, силе тока в проводнике, длине проводника и синусу угла между направлением тока и вектора магнитной индукции:*

$$F_A = BI\ell \sin \alpha , \quad (8.1)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике;  $\ell$  – длина проводника;  $\alpha$  – угол между направлением поля и тока;  $B = \frac{F_A}{I\ell}$  – **вектор индукции магнитного поля**, численно равный силе Ампера, с которой магнитное поле действует на проводник с током единичной длины, по которому течет ток 1 А, если угол между направлением поля и тока равен  $90^\circ$  (т.к. тогда  $\sin 90^\circ = 1$ ).

Размерность индукции:  $[B] = \text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м}) = \text{Тл}$  (Тесла).

**Вектор индукции** является силовой характеристикой магнитного поля.

**Направление вектора индукции магнитного поля совпадает с направлением касательной к силовой линии магнитного поля в каждой ее точке** (Рис.8.1).

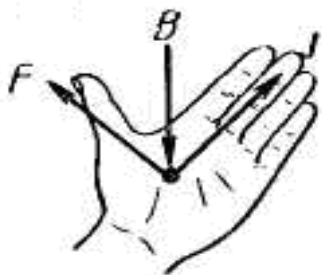


Рис. 8.2

Направление силы Ампера определяется по правилу «левой руки» (Рис.8.2): если направление силы тока в проводнике совпадает с направлением вытянутых четырех пальцев левой руки, а линии индукции магнитного поля входят в ладонь, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Ампера.

**Магнитное поле называется однородным**, если величина индукции магнитного поля в каждой точке пространства постоянна. Графически это означает, что «густота» линий индукции магнитного поля должна быть постоянной. И наоборот, если индукция магнитного поля не постоянна, т.е. «густота» линий индукции не постоянна, то магнитное поле называется **неоднородным**. Примером неоднородного магнитного поля может быть рис.8.1 – поле постоянного магнита; рис.8.3 – магнитное поле Земли.

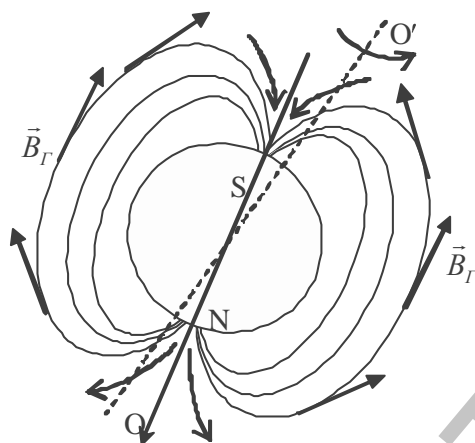


Рис.8.3

Земля представляет собой огромный шаровой магнит. Поэтому в любом пункте поверхности Земли и в окружающем пространстве проявляется действие магнитных сил. Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими. Южный полюс магнитного поля Земли размещается около северных берегов Америки, приблизительно под  $74^\circ$  северной широты и  $100^\circ$  западной долготы, а северный полюс – в Антарктиде, под  $60^\circ$  южной широты и  $143^\circ$  восточной долготы. Схема силовых линий магнитного поля Земли показана на рис. 8.3 (пунктиром показана ось вращения Земли -  $OO'$  и направление вращения Земли). Направление магнитных силовых линий Земли определены с помощью магнитной стрелки (стрелки компаса).

Если поднести магнитную стрелку на нитке так, чтобы пункт подвеса совпал с центром тяжести стрелки, то последняя устанавливается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли. В северном полушарии южный конец стрелки будет наклонен к Земле и она будет создавать с горизонтом угол наклона  $\theta$  (греч. «тета») – магнитное наклонение. Вертикальная плоскость, в которой разместится стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол  $\alpha$  между магнитным и географическим меридианами называется магнитным склонением. Значения индукции магнитного поля  $\vec{B}$  Земли невелики и меняются от  $0,42 \cdot 10^{-4}$  Тл на экваторе до  $0,7 \cdot 10^{-4}$  Тл около магнитных полюсов.

Вектор индукции магнитного поля Земли можно разложить на две составляющие: горизонтальную  $\vec{B}_Г$  и вертикальную  $\vec{B}_В$ . Закрепленная на вертикальной оси магнитная стрелка устанавливается в направлении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли -  $\vec{B}_Г$ . Магнитное наклонение  $\theta$ ; магнитное склонение  $\alpha$  и горизонтальная составляющая  $\vec{B}_Г$  являются основными параметрами магнитного поля Земли.

Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли определяют с помощью прибора, который называется тангенс-гальванометр. Схематическое уст-

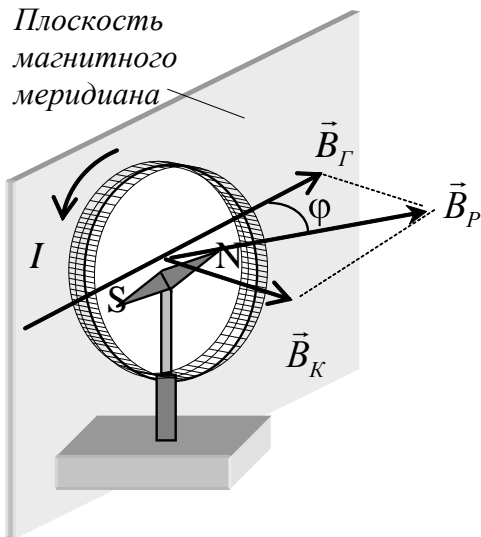


Рис.8.4

стрелку. Направление вектора индукции магнитного поля, созданного катушкой с током, определяется **правилом «буравчика»**: *если направление вращения ручки «буравчика» (правого винта) совпадает с направлением тока в рамке, то поступательное движение «буравчика» покажет направление вектора индукции магнитного поля*. Вектор индукции магнитного поля катушки  $\vec{B}_K$  направлен перпендикулярно горизонтальной составляющей поля Земли  $\vec{B}_G$ . В результате, на магнитную стрелку  $N-S$  будут действовать сразу два магнитных поля: поле Земли и поле, созданное катушкой с током. Согласно **принципа суперпозиции**: *вектор индукции результирующего магнитного поля есть векторная сумма векторов индукции всех полей*. При сложении индукции горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $\vec{B}_G$  и индукции магнитного поля катушки с током  $\vec{B}_K$  возникает индукция результирующего магнитного поля  $\vec{B}_P$ , действующая на магнитную стрелку. Вектор  $\vec{B}_P$  направлен под углом  $\varphi$  к плоскости магнитного меридиана. В результате, на магнитную стрелку действует вращающий момент, который поворачивает – ориентирует магнитную стрелку по направлению вектора результирующего магнитного поля  $\vec{B}_P$ .

Из рис.8.4 видно, что:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{|\vec{B}_K|}{|\vec{B}_G|} . \quad (8.2)$$

Индукция магнитного поля контура  $B_K$  в центре кругового витка равна:

$$B_K = \mu_0 \frac{nI}{2R} , \quad (8.3)$$

где  $n$  – количество витков контура;  $I$  – сила тока, который протекает в контуре;  $R$  – радиус контура;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Из (8.2) и (8.3) находим, что:

$$B_G = \mu_0 \frac{nI}{2R \cdot \operatorname{tg} \varphi} . \quad (8.4)$$

Необходимо помнить, что формула (15.4) является приближительной, т.е. верной только в том случае, если размер магнитной стрелки много меньше радиуса катушки  $R$ . Наименьшая погрешность при измерениях получается при углах отклонения стрелки  $\varphi = 45^\circ$ .

ройство прибора показано на рис.8.4. Он состоит из катушки – нескольких круговых проводников, размещенных вертикально в плоскости магнитного меридиана (диаметр катушки и количество витков указывается на приборе). В центре размещается магнитная стрелка. Она должна быть небольшой, чтобы можно было считать индукцию магнитного поля в пределах стрелки равной индукции в центре кругового витка с током.

Плоскость контура устанавливается перпендикулярно горизонтальной плоскости так, чтобы она совпала с направлением магнитной стрелки  $N-S$ . Ток  $I$ , который протекает по контуру, создает магнитное поле, которое действует на магнитную

### Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему (Рис.8.5).
2. Установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана (по направлению магнитной стрелки компаса).
3. Переключателем  $S$  подключить цепь к источнику тока и измерить величину силы тока  $I$ .
4. После успокоения стрелки компаса отсчитать на его шкале угол  $\varphi_1$ .
5. Изменить направление тока в катушке с помощью переключателя  $S$ , подождать успокоения стрелки компаса и отсчитать по его шкале угол  $\varphi_2$ .

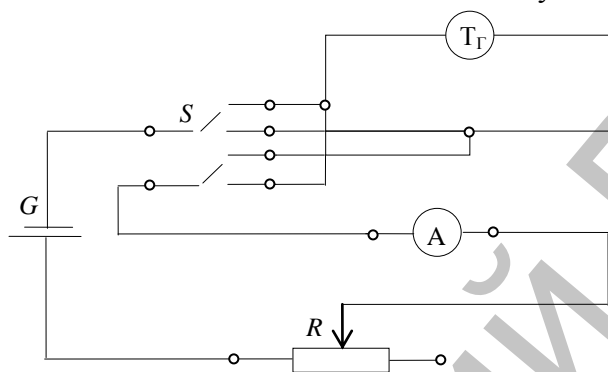


Рис.8.5

6. Найти среднее значение угла отклонения  $\varphi$  при данном значении силы тока:

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (8.5)$$

7. По формуле (8.4) найти значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли, где  $R=0,075$  м — радиус витков катушки;  $n=200$  — количество витков.
8. Измерения повторить еще два раза при других значениях тока, изменяя положением движка реостата  $R$ .
9. Найти среднее значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли  $B_{\Gamma}$ . Произвести расчет абсолютной и относительной погрешности измерений.
10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.
11. На основании анализа относительной погрешности сделать вывод, при каких значениях угла отклонения магнитной стрелки точность определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли наибольшая и почему?

N	$I$ , А	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi$	$B_{\Gamma}$ , мТл	$\langle B_{\Gamma} \rangle$ , мТл	$\Delta B_{\Gamma}$ , мТл	$\langle \Delta B_{\Gamma} \rangle$ , мТл	$\frac{\langle \Delta B_{\Gamma} \rangle}{\langle B_{\Gamma} \rangle} 100\%$
1									
2									
3									

## Вычисления:

### Вывод:

#### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Что такое магнитное поле? Что является источником магнитного поля? Нарисуйте магнитное поле постоянного магнита, Земли. Как направлены силовые линии магнитного поля?
2. Запишите и сформулируйте закон Ампера для проводника с током в магнитном поле. Как определяется направление силы Ампера?
3. Запишите и сформулируйте определение вектора индукции магнитного поля. Как он направлен по отношению к силовым линиям? Как определить направление индукции магнитного поля, созданного катушкой с током?
4. Что такое однородное и неоднородное магнитное поле? Приведите их примеры.
5. Как можно определить плоскость магнитного меридиана Земли?
6. Нарисуйте рис.8.4, объясните методику проведения опыта и на основании принципа суперпозиции получите формулу для вычисления горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

## Лабораторная работа № 9

### Определение фокусных расстояний и оптической силы линз

**Цель работы:** изучить основные типы и характеристики линз, недостатки линз и способы их устранения; научиться определять фокусное расстояние и оптическую силу линз.

**Приборы и принадлежности:** набор собирающих линз, оправка для линз, оптическая скамья, экран с белой поверхностью, источник света, предмет в оправке.

#### Теория работы

**Линза** - это прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями. Линзы входят в состав разнообразных оптических приборов, широко используемых в биологической и медицинской практике, таких как микроскопы, лупы, эндоскопы, бронхоскопы, гастроскопы, цитоскопы и др. Линзы являются основным элементом многих оптических приборов для лабораторного анализа, кино- и фотоаппаратов и т.д.

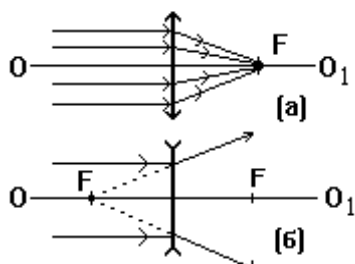


Рис. 9.1

Линзы подразделяются на собирающие (выпуклые) и рассеивающие (вогнутые). **Собирающая линза** - это линза, в которой световые лучи (Рис.9.1.а), падающие на линзу параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$ , преломляясь в линзе, собираются в её фокусе  $F$ .

**Фокусное расстояние собирающей линзы** - расстояние от оптического центра линзы до точки фокуса, и обозначаемое также  $F$ , считается у собирающей линзы положительным, т.е.  $F > 0$ .

**Рассеивающая линза** - это линза в которой световые лучи (Рис.9.1.б), падающие на линзу параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$ , преломляясь в линзе, расходятся. Для нахождения её точки фокуса, выходящие из линзы лучи продляют в обратную сторону до пересечения с главной оптической осью  $OO_1$ . Фокусное расстояние рассеивающей линзы считается отрицательным, т.е.  $F < 0$ , а сам фокус - мнимым.

Величина  $D$ , обратная фокусному расстоянию линзы, называется **оптической силой линзы** и измеряется в диоптриях (дптр):

$$D = \frac{1}{F}, \quad D = \frac{1}{F} = \frac{1}{m} = \text{дптр}. \quad (9.1)$$

Оптическая сила собирающей линзы, также как и фокус, положительна  $D_{\text{соб.}} > 0$ , а оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна, т.е.  $D_{\text{расс.}} < 0$ .

**Оптическая сила системы линз  $D_{\text{сист.}}$**  численно равна алгебраической сумме оптических сил линз, входящих в её состав, т.е.  $D_{\text{сист.}} = D_1 + D_2 + \dots$  (9.2)

Изображения, получаемые с помощью собирающих линз, не всегда получаются идеальными. Это связано с не идеальностью сферической поверхности линзы. Такие **недостатки линз называются абберациями**. Возможно возникновение четырех видов аббераций.

1) **Сферическая абберация**, при которой все световые лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, собираются не в фокусе линзы. Лучи, идущие ближе к оптическому центру - собираются в фокусе, а лучи, идущие от краев линзы - собираются немного дальше. В результате изображение точечного источника света будет выглядеть как световое пятно.

Для устранения сферической аберрации используют диафрагму, которая отсекает из светового пучка лучи, идущие от краев линзы. **Диафрагма** – это регулируемое отверстие. Диафрагму, например, можно увидеть в объективе фотоаппарата; зрачок глаза также является своеобразной диафрагмой, регулирующей поток света, поступающего в глаз.

2) **Хроматическая аберрация**, при которой белый свет, проходя через стеклянную линзу, разлагается на составляющие его цвета (греч. «хромос» – цвет). Это происходит за счет явления **дисперсии света** – зависимости показателя преломления вещества от длины световой волны. В результате изображение точечного источника белого света на экране принимает вид радужно окрашенного светового пятна. Для устранения хроматической аберрации используют вторую рассеивающую линзу, называемую **ахроматор**.

3) **Дисторсия**, при которой световые лучи, падающие на линзу под разными углами к главной оптической оси, собираются в разных точках на фокальной плоскости. В результате, изображение предмета становится искаженным (выпуклым или вогнутым). Для устранения дисторсии также используют диафрагму, которая отсекает световые лучи, падающие на линзу не параллельно главной оптической оси.

4) **Астигматизм**, при котором сама линза в результате неидеальной сферической поверхности, имеет различное увеличение во взаимно перпендикулярных направлениях. В результате изображение предмета становится непропорционально увеличенным – вытянутым в одном из направлений. Такой недостаток встречается у такой линзы как хрусталик глаза. Тогда, например, изображение квадрата воспринимается человеком с астигматизмом, как прямоугольник. Для устранения астигматизма используют цилиндрическую линзу (очки с цилиндрической линзой), которая увеличивает предмет только в одном направлении, восстанавливая пропорции в изображении предмета.

## Порядок выполнения работы

### Задание №1. Нахождение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы

При построении изображения в собирающей линзе (Рис.9.2) необходимо придерживаться следующего плана построения:

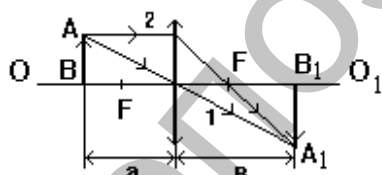


Рис. 9.2

1. провести главную оптическую ось  $OO_1$ ;
2. нарисовать собирающую линзу так, чтобы главная оптическая ось проходила через ее оптический центр (обратите внимание, что собирающая линза обозначается двумя стрелками, направленными наружу);
3. отметить точки – фокусы  $F$  на равных расстояниях с разных сторон линзы;
4. поставить предмет  $AB$  на расстоянии от линзы не дальше, чем удвоенное фокусное расстояние (иначе изображение получится не увеличенное, а уменьшенное; если предмет будет находиться в двойном фокусе, то размер изображения будет вообще равен размеру предмета);
5. от каждой точки предмета  $AB$  проводят два луча: **1-й луч** - через оптический центр линзы идет **не преломляясь**; **2-й луч** - сначала, параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$  до линзы, а затем через фокус до пересечения с первым лучом. Таким образом, изображение предмета  $A_1B_1$  в данном случае получается **увеличенным, перевернутым и действительным**.



Характерные расстояния:  $a$  - расстояние от предмета до линзы;  $b$  - расстояние от линзы до полученного изображения и фокусное расстояние  $F$  связаны между собой формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} . \quad (9.2)$$

Выразив из формулы (9.2)  $F$ , мы получим выражение для нахождения фокусного расстояния собирающей линзы:

$$F = \frac{ab}{a+b} . \quad (9.3)$$

Оптическая сила собирающей линзы определяется по формуле (9.1).

### Порядок выполнения задания №1

1. На оптическую скамью поставить собирающую линзу и предмет.
2. Перемещая линзу, найти положение, при котором видно отчетливое изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  на экране (Рис.9.2).
3. Измерить линейкой расстояния  $a$  и  $b$ .
4. Изменить положение предмета приблизительно на 5 см. Перемещая линзу, снова найти четкое изображение предмета. Опыт повторить три раза.
5. По формуле (9.3) рассчитать фокусное расстояние собирающей линзы. Найти среднее значение фокусного расстояния.
6. Оценить абсолютную и относительную погрешность измерений.
7. По среднему значению фокусного расстояния, по формуле (9.1) рассчитать оптическую силу собирающей линзы.
8. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 1.

Таблица 1.

№	$a$ , м	$b$ , м	$F$ , м	$\langle F \rangle$ , м	$\Delta F$ , м	$\langle \Delta F \rangle$ , м	$\varepsilon$ , %	$F = \langle F \rangle \pm \langle \Delta F \rangle$ , м	$\langle D \rangle$ , дптр
1									
2									
3									

### Вычисления к заданию №1:

**Задание №2. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы методом Бесселя**

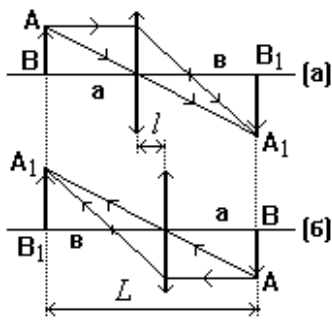


Рис. 9.3

Указанный выше метод определения главных фокусов является приближенным. Бессель предложил точный способ нахождения главных фокусных расстояний линз. Он заключается в том, что предмет и экран остаются неподвижными, а перемещается только линза, которую нужно устанавливать в двух положениях: в первом положении линза дает увеличенное изображение, а во втором положении линза дает уменьшенное изображение. Из формулы для нахождения фокусного расстояния собирающей линзы:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$  видно, что величины

$a$  и  $b$  можно менять местами. Такая замена означает, что если на место изображения  $A_1B_1$  в положении (б) (Рис.9.3) поставить предмет  $AB$  из положения (а), то изображение в случае (б) предмета  $AB$  получится в том же месте, где раньше был предмет.

Исходя из рис.9.3.а и б, следует, что:  $\begin{cases} L = a + b \\ l = a - b \end{cases}$ . Решая совместно эту систему уравнений относительно  $a$  и  $b$ , получим:

$$a = \frac{L+l}{2} \text{ и } b = \frac{L-l}{2}. \quad (9.4)$$

Подставляя (9.4) в (9.3), получим формулу нахождения главного фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя:

$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L}. \quad (9.5)$$

**Порядок выполнения задания №2**

1. На оптическую скамью поставить собирающую линзу и предмет.
2. Расположить экран и предмет на таком расстоянии друг от друга, чтобы, перемещая между ними линзу, можно было получить два отчетливых изображения (увеличенное и уменьшенное) предмета.
3. Измерить расстояние  $L$  (рис.9.3) между экраном и предметом.
4. Перемещая линзу, получить увеличенное изображение предмета на экране, заметить по линейке положение линзы. Затем, передвигая линзу, получить уменьшенное изображение предмета, заметить по линейке положение линзы. Вычислить расстояние  $l$  между двумя положениями линзы.
5. Меняя положение предмета и линзы, повторить измерения ещё два раза.
6. По формуле (9.5) вычислить фокусное расстояние. Рассчитать его среднее значение. Оценить погрешности измерений.
7. По среднему значению фокусного расстояния, по формуле (9.1) рассчитать оптическую силу линзы.
8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2.

№	$L$ , м	$l$ , м	$F$ , м	$\langle F \rangle$ , м	$\Delta F$ , м	$\langle \Delta F \rangle$ м	$\epsilon$ , %	$F = \langle F \rangle \pm \langle \Delta F \rangle$ , м	$\langle D \rangle$ , дптр
1									
2									
3									

## Вычисления к заданию №2:

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Что называется линзой? Какие существуют типы линз?
2. Дайте определение фокуса линзы. Чем отличаются фокусные расстояния и оптические силы собирающей и рассеивающей линз?
3. Какие существуют виды aberrаций? Как их устранить?
4. Нарисуйте и объясните принцип построения изображения в собирающей линзе.
5. Объясните принцип определения фокусного расстояния собирающей линзы двумя методами.
6. Запишите и объясните формулы: линзы, её фокусного расстояния и оптической силы.

## Лабораторная работа №10 Определение концентрации растворов с помощью рефрактометра

**Цель работы:** изучить явления преломления, рефракции света, научиться определять показатель преломления и концентрацию растворов с помощью рефрактометра и анализировать результаты.

**Приборы и принадлежности:** рефрактометр, сосуды с дистиллированной водой и растворами спирта разной концентрации, пипетка.

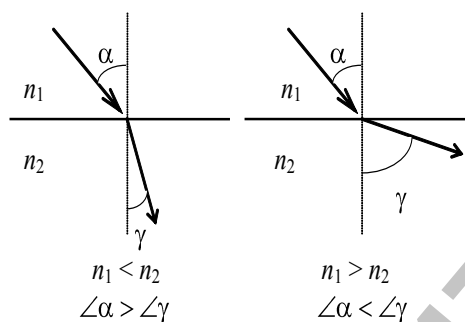
### Теория работы

**Свет** - это поперечная электромагнитная волна. При переходе света из одной среды в другую изменяется скорость распространения световых волн, а вследствие этого изменяется направление распространения света.

В каждой среде скорость света изменяется по-разному. Для характеристики способности вещества изменять скорость распространения электромагнитных волн используется абсолютный показатель преломления вещества.

**Абсолютный показатель преломления среды** показывает во сколько раз скорость света в вакууме  $c$  больше скорости света в данной среде  $v$

$$n = \frac{c}{v} \quad (10.1)$$



Если известен показатель преломления данного вещества, то скорость распространения света в нем можно определить как:

$$v = \frac{c}{n} \quad (10.2)$$

где скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Среда с показателем преломления  $n_1$ , в которой свет распространяется быстрее, называется менее оптически плотной, а среда с показателем преломления  $n_2$ , в которой свет распространяется медленнее, - более оптически плотной и для этих веществ  $n_1 < n_2$ .

Рис. 10.1

При переходе света из одного вещества с показателем преломления  $n_1$  в другое с показателем преломления  $n_2$  может наблюдаться два случая преломления света (Рис.10.1):

а)  $n_1 < n_2$ , т.е., свет переходит из менее оптически плотной среды в более оптически плотную. (Например, из воздуха в стекло). При этом угол падения света  $\alpha$  больше угла преломления  $\gamma$ ;

б)  $n_1 > n_2$ , т.е., свет переходит из более оптически плотной среды в менее оптически плотную. (Например, из стекла в воздух). При этом угол падения света  $\alpha$  меньше угла преломления  $\gamma$ . **Рефракцией света** называется искривление световых лучей при переходе из среды с одной оптической плотностью в среду с другой оптической плотностью (большей или меньшей).

Для монохроматического света (света с определенной длиной волны) справедлив **закон преломления**, согласно которому: синус угла падения  $\alpha$  так относится к синусу угла преломления  $\gamma$ , как скорость света в первой среде  $v_1$  к скорости света во второй среде  $v_2$ , или абсолютный показатель преломления второй среды  $n_2$  к абсолютному показателю преломления первой среды  $n_1$ :

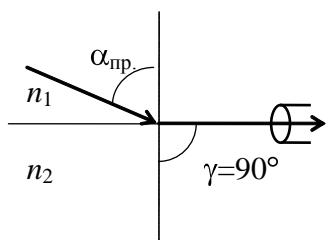


Рис.10.2

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (10.3)$$

Рассмотрим случай рефракции - перехода света из более оптически плотной в менее оптически плотную среду (Рис.17.1.б). При увеличении угла падения света  $\alpha$  угол преломления  $\gamma$  будет всегда больше. При каком-то максимальном угле падения, называемом **предельным углом**  $\alpha_{\text{пр}}$ , угол преломления  $\gamma$  станет равным

$90^\circ$ , тогда как  $\alpha_{\text{пр}}$  будет оставаться меньше  $90^\circ$  (Рис.10.2). При этом преломленный луч будет идти по границе раздела сред, не выходя во вторую среду. *Явление рефракции, при котором угол преломления света равен  $90^\circ$  и свет вообще не выходит во вторую среду называется **полным внутренним отражением**.*

Если на пути преломленного светового луча (Рис.10.2) поставить зрительную трубку (окуляр), то в его поле зрения будет наблюдаться граница раздела светлой и темной области. Область, лежащая выше преломленного луча, окажется светлой, а нижняя область - темной. Для этого случая полного внутреннего отражения закон преломления света (10.3) запишется в виде:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{пр}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ но, учитывая, что } \sin 90^\circ = 1, \text{ получим: } \sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}$$

и выражая отсюда показатель преломления второй среды, получим:

$$n_2 = n_1 \cdot \sin \alpha_{\text{пр}}. \quad (10.4)$$

Зная показатель преломления первой среды, допустим стекла, и измерив предельный угол падения света в случае полного внутреннего отражения, можно по формуле (10.4) рассчитать показатель преломления второго вещества, допустим жидкости.

На основании полного внутреннего отражения света работают приборы для определения показателя преломления вещества, называемые **рефрактометрами**. Поскольку показатель преломления растворов зависит от концентрации растворенного вещества, то рефрактометр также можно использовать и для определения концентраций растворов. Шкала рефрактометра проградуирована в заводских условиях по эталонным значениям показателей преломления и концентрации веществ. Поэтому, достаточно для неизвестного раствора, помещенного в рефрактометр, добиться условия полного внутреннего отражения, чтобы по шкалам прибора определить искомые: концентрацию и показатель преломления.

## Порядок выполнения работы

### 1. Определение нуля прибора:

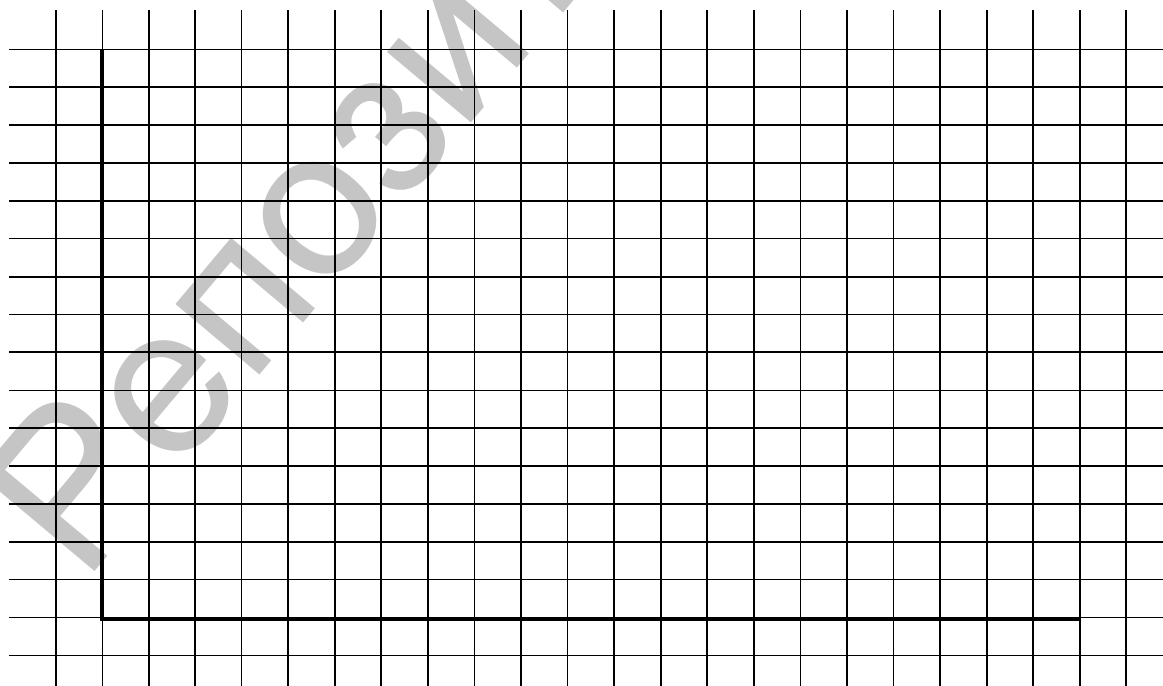
- 1.1. открыть верхнюю камеру, промыть и вытереть досуха соприкасающиеся плоскости призмы;
- 1.2. нанести пипеткой на поверхность измерительной призмы 1-2 капли дистиллированной воды;
- 1.3. поворачивая окуляр, добиться четкого изображения поля зрения;
- 1.4. глядя в окуляр, перемещать источник света, добиваясь наибольшей контрастности поля зрения;
- 1.5. совместить перекрестье (прицел) с границей светотени, перемещая рукоятку;
- 1.6. по левой шкале отсчитать нульпункт прибора (т.е. показатель преломления дистиллированной воды), а по правой шкале - концентрацию (в случае дистиллированной воды концентрация равна нулю).

**2. Определение показателя преломления и концентрации растворов спирта:**

- 2.1. при определении показателя преломления и концентрации спиртовых растворов все операции производить в той же последовательности как и при определении нуля прибора. Только вместо дистиллированной воды на поверхность измерительной призмы наносить 1-2 капли исследуемого раствора в порядке номеров, указанных на сосудах (№№1,2,3,4);
- 2.2. глядя в окуляр, по левой шкале отсчитывать показатель преломления данного раствора, а по правой его концентрацию;
- 2.3. по формуле (10.2) рассчитать скорость света в растворах с различной концентрацией;
- 2.4. результаты измерений и вычислений занести в таблицу;
- 2.5. построить графики зависимостей:
  - 2.5.1. показателя преломления от концентрации  $n=n(C, \%)$ ;
  - 2.5.2. скорости света в данном растворе от концентрации  $v=v(C, \%)$ .
- 2.6. сделать выводы о зависимости показателя преломления и скорости света в растворах от их концентрации.

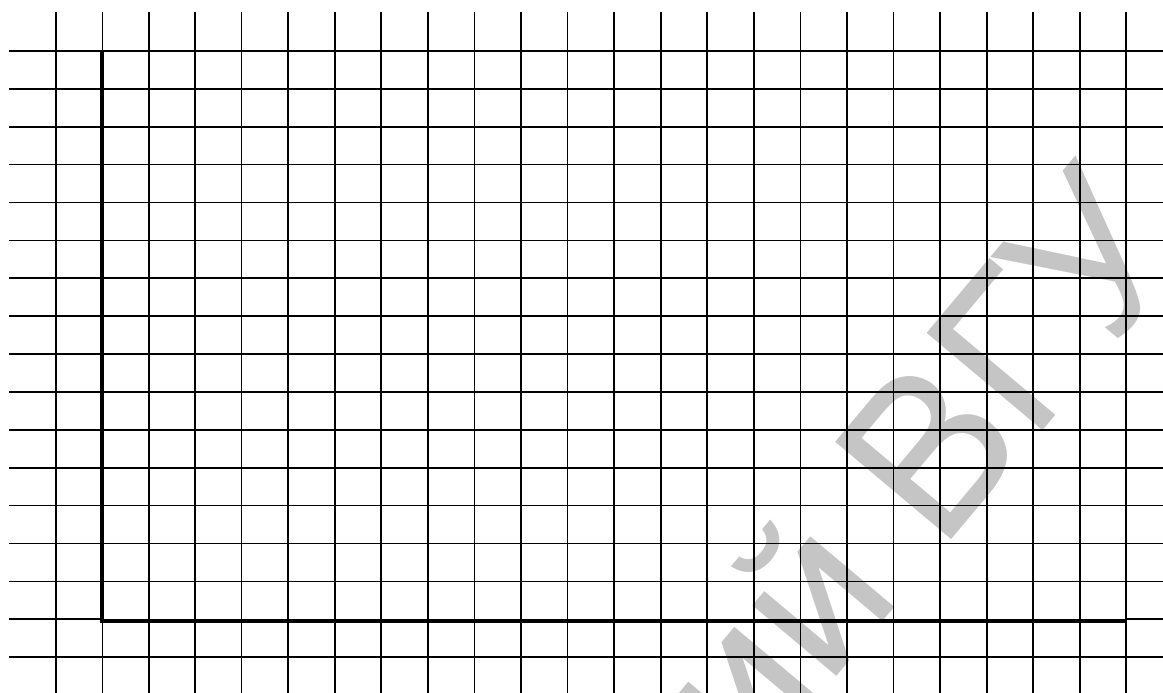
№ раствора	$n$	$C, \%$	$v, \text{м/с}$
Дист. вода			
1			
2			
3			
4			
5			
6			

**График зависимости  $n=n(C, \%)$ .**



**Вывод:**

**График зависимости  $n=n(C, \%)$**



**Вывод:**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:**

1. Запишите и дайте определение абсолютного показателя преломления.
2. Запишите и дайте определение закона преломления света.
3. Нарисуйте и объясните два случая преломления света.
4. Нарисуйте и объясните случай полного внутреннего отражения света.
5. Запишите и объясните закон преломления для случая полного внутреннего отражения света.

## Раздел №2. Теоретические материалы для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика»

### №1. Биомеханические процессы в опорно-двигательном аппарате человека и животных. Механические свойства тканей организма

**Опорно-двигательный аппарат человека и животных** – это система сочленённых между собой костей скелета, к которым в определённых точках прикрепляются мышцы. Кости соединяются между собой в суставах.

**Основной механической характеристикой сустава является число степеней свободы в нём, равное числу осей, вокруг которых возможно взаимное вращение сочленённых костей.**

**Числом степеней свободы любой механической системы называют число независимых координат, необходимых для описания перемещений системы в пространстве.**

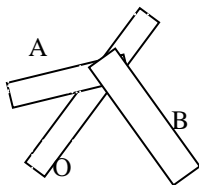


Рис. 1.1

Рассмотрим систему из двух звеньев  $A$  и  $B$ , соединённых осью  $OO$  (Рис.1.1). Это **одноосное двухзвенное соединение**. При неподвижном звене  $A$  и  $B$  имеют одну степень свободы. Примером такого соединения в организме человека и некоторых животных являются надпяточный, фаланговый и плечелоктевой суставы. Они допускают только возможность сгибания и разгибания с одной степенью свободы.

Рассмотрим трёхзвенное соединение элементов  $A$ ,  $B$  и  $C$  с осями  $OO$  и  $O'O'$  (Рис.1.2). При одном направлении осей система называется одноосной. **Двухосное соединение допускает вращение звеньев по двум взаимно перпендикулярным осям.** При неподвижном звене  $A$  звено  $B$  обладает одной степенью свободы, в том числе и ось  $O'O'$ . Звено  $C$ , вращаясь вокруг оси  $O'O'$ , имеет ещё одну степень свободы, то есть две. Примером такого соединения является лучезапястный сустав, в котором осуществляется сгибание и разгибание, а также приведение и отведение кисти.

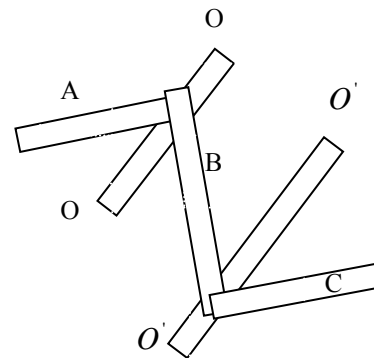


Рис. 1.2

**Трёхосное соединение осуществляет вращение вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей и называется «шаровой шарнир»** (Рис 1.3). Такое соединение осуществлено в тазобедренном суставе, в лопаточно-плечевом суставе, и имеет три степени свободы. Шесть степеней свободы имеет череп, благодаря некоторой подвижности межпозвоночных суставов.

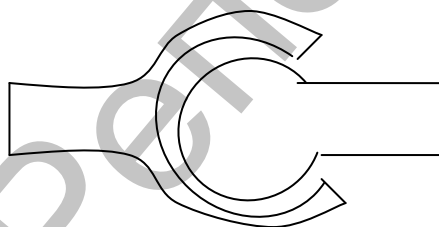


Рис.1.3

С точки зрения физики, опорно-двигательный аппарат представляет собой совокупность рычагов, удерживающих человека и животных в равновесии.

Когда мы стоим, держим груз, то рычаг, который выполняет данное действие, находится в состоянии равновесия. **Условие равновесия любого рычага: сумма всех моментов сил, действующих на рычаг должна быть равна нулю.**



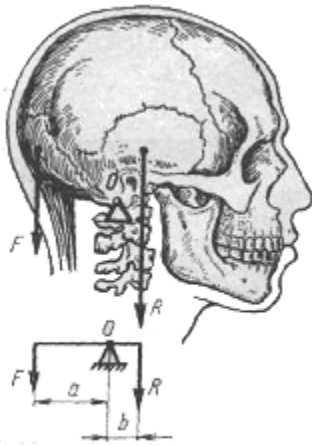


Рис. 1.4

### 1) Рычаг равновесия (Рис. 1.4)

Силы приложены по обе стороны от точки опоры. Условие равновесия рычага:  $F \cdot a = R \cdot b$ . Например, череп, рассматриваемый в сагиттальной плоскости. Ось  $O$  вращения рычага проходит через сочленение черепа с первым позвонком. Спереди от точки опоры на относительно коротком плече действует сила тяжести головы  $R$ , приложенная в центре масс черепа несколько позади турецкого седла, позади сила  $F$  тяги мышц и связок, прикрепленных к затылочной кости.

### 2) Рычаг силы (Рис.1.5)

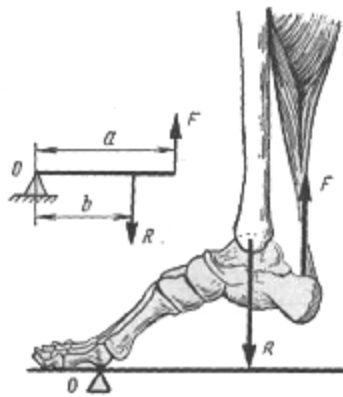


Рис. 1.5

Сила  $F$  приложена на конце рычага, сила  $R$  ближе к точке опоры. Условие равновесия:  $F \cdot a = R \cdot b$ , но  $a > b$ , следовательно,  $F < R$ . Т. е., рычаг дает выигрыш в силе, но проигрыш в перемещении и называется **рычагом силы**. Пример - действие свода стопы при подъеме на полупальцах. Опорой  $O$  рычага, через которую проходит ось вращения, служат головки плюсневых костей. Преодолеваемая сила - вес всего тела приложена к таранной кости. Действующая мышечная сила  $F$ , осуществляющая подъем тела, передается через ахиллово сухожилие и приложена к выступу пяточной кости.

### 3) Рычаг скорости (Рис.1.6)

Сила  $F$  приложена ближе к точке опоры, чем сила  $R$ . Условие равновесия  $F \cdot a = R \cdot b$ , но  $a < b$ , следовательно,  $F > R$ , т. е. рычаг дает проигрыш в силе за счет выигрыша в перемещении и называется **рычагом скорости**. Пример - кости предплечья. Точка опоры находится в локтевом суставе. Действующая сила  $F$  - сила мышц, сгибающих предплечье, сила сопротивления  $R$  - сила тяжести поддерживаемого груза, приложенная обычно к кисти, а также собственный вес предплечья (приложен в его центре масс).



Рис. 1.6

Если рассматривать скелет как совокупность отдельных звеньев, соединённых в один механизм, то окажется, что все эти звенья при нормальной стойке образуют систему, находящуюся в крайне неустойчивом равновесии. И если вся система находится в равновесии, то только благодаря постоянному напряжению поддерживающих систему мышц.

Мышцы составляют активную часть опорно-двигательного аппарата. Под действием нервных импульсов они сокращаются, развивая при этом определённые усилия. При этом совершается внешняя работа по перемещению каких-либо

тел. Такое сокращение мышцы называется **изотоническим**, то есть при постоянной силе. Имеется и другой вид сокращения, при котором мышца развивает усилие, не изменяя свою длину. Такое сокращение мышцы называется **изометрическим**. При этом внешней работы по перемещению тел мышца не совершает. Такое сокращение даёт возможность удерживать предметы и орудия труда.

Исследование работоспособности мышц, измерение механической работы, совершаемой человеком в различных условиях, а также влияние этой работы на организм называется **эргометрией**, а соответствующие приборы – **эргометрами**.

Механические свойства тканей необходимо учитывать при защите человека и животных от вибраций. В травматологии, хирургии и ортопедии необходимо знать устойчивость биологических структур по отношению к различным деформациям, в спорте и космонавтике обращают внимание на физические возможности опорно-двигательного аппарата.

Кости в соответствии с их опорной и защитной функциями резко отличаются по механическим свойствам от мышц и других биоматериалов. Минеральное содержание кости обеспечивает быструю деформацию, а полимерная часть обеспечивает ползучесть. При небольших деформациях для костей справедлив закон Гука. Модуль упругости кости около  $10^9$  Па, что на несколько порядков выше модуля упругости мышц.

Кости характеризуются большой механической прочностью. Её механическое разрушение начинается при  $\sigma = (10 \div 12) \cdot 10^7$  Па (для тканей стенок артерии и вены разрушение начинается при  $\sigma = 10^6$  Па).

Стенки кровеносных сосудов построены из вязко-эластичного материала (за исключением капилляров). Поэтому крупные сосуды способны к значительным обратимым изменениям размера при действии на их стенку внешней силы.

Упругие свойства и прочность мышечной и соединительной тканей определяются эластиновыми и коллагеновыми волокнами и их комплексами. На долю этих волокон, например, в стенках крупных сосудов, приходится около 50% сухой массы. Обладая высоким модулем упругости (эластиновые нити  $E_s = 10^6$  Па, коллагеновые нити  $E_k = 10^7$  Па) и прочностью, эти волокна предотвращают разрыв сухожилий, связок, стенок кровеносных сосудов и других тканей.

Прочность костей обусловлена наличием стекловолоконистых структур, построенных из коллагена и кристаллов гидроксилатапата, а также трубчатую форму.

## **№2. Природа звука. Физические основы биологической акустики**

*Акустикой называют область физики, исследующую упругие колебания и волны, методы получения и регистрации этих волн, их взаимодействие с веществом и биологическими объектами, а также их разнообразные применения.*

Частота акустических волн находится в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{13}$  Гц и делится на: инфразвук (ИЗ) ( $0 \div 16$  Гц), звук ( $16 \div 20000$  Гц) и ультразвук (УЗ) ( $2 \cdot 10^4 \div 10^{13}$  Гц).

**Звук** – это продольные волны, распространяющиеся в упругой среде и воспринимаемые органами слуха.

В связи с важностью акустических понятий для оценки слуховых ощущений, а также в связи с рядом медицинских приложений данного раздела, рассмотрим некоторые характеристики звука, поскольку он несёт около 15% информации

об окружающем мире, а также может быть источником информации о состоянии внутренних органов человека и животных.

Источником звука являются любые тела, совершающие колебания в результате каких-либо механических воздействий. Источники тональных звуков: камертон и струны, мембраны, трубы, сирены и др. В процессе эволюции различные виды живых существ выработали такие способы испускания звуковых сигналов, которые удобны для внутривидового общения и для охоты, и поэтому органы звукоизлучения весьма разнообразны. Например, *членистоногие* издают звуковые сигналы трением или ударом одних органов о другие (фрикционный или ударный механизм), вибрацией мембран (крыльев), пропусканием воздуха через отверстие. **Рыбы** значительную часть звуков издают при движении в результате срыва водяных вихрей с поверхности их тела. У **птиц** звуки удивительно разнообразны как по громкости, так и по спектральному составу. Источником звука является голосовой аппарат, а у безголосых – «инструментальный» голос, в испускании которого принимают участие клюв, лапы, крылья. **Млекопитающие** звук издают с помощью колебания голосовых связок. Роль резонатора выполняют гортанные мешки, ротовая и носовая полости и даже лёгкие. Звуки млекопитающих очень разнообразны, находясь в диапазоне частот от нескольких Гц до сотен кГц (у летучих мышей).

Звуки разделяют: тоны или музыкальные звуки, шумы, звуковые удары.

**Тон** – это звук, являющийся периодическим процессом с постоянной или закономерно изменяющейся во времени частотой. (Например, устройство камертон, применяющийся для настройки музыкальных инструментов, дает звуковую волну со строго определенной частотой). Если это гармонический процесс, то тон называется простым или чистым. Негармоническому колебанию соответствует сложный тон, который может быть разложен на простые.

**Шумом** называют звук, отличающийся сложной, не повторяющейся во времени зависимостью (шорох, скрип, аплодисменты и т. д.).

**Звуковой удар** – это кратковременное звуковое действие (взрыв, хлопок, стук).

Область вещества, в которой распространяется звуковая волна, называется **акустическим полем**, которое характеризуют **интенсивностью** звуковой волны и **акустическим давлением**.

Скорость звука в различных средах различна:

$$v_{\text{газ}} \approx 0,2 \div 1,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}, \quad v_{\text{жидк}} \approx 1,2 \div 2 \frac{\text{км}}{\text{с}}, \quad v_{\text{тв}} \approx 2 \div 5 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

**Интенсивностью или силой звука** называют плотность потока энергии звуковой волны:

$$J = \frac{W}{S \cdot t}. \quad (2.1)$$

Размерность интенсивности:  $J = \text{Вт}/\text{м}^2$ .

**Звуковое давление** – это дополнительное давление  $P$ , которое возникает в среде при прохождении звуковых волн. Для плоской гармонической волны давление связано с интенсивностью звука соотношением:

$$J = \frac{P_0^2}{2\rho v} = \frac{P_{\text{эф}}^2}{\rho v}, \quad (2.2)$$

где  $P_0$  – амплитудное значение;  $P_{\text{эф}}$  – эффективное значение давления;  $\rho$  – плотность среды;  $v$  – скорость звука в среде.

Органы слуха человека и животных могут воспринимать акустические колебания не только в определённом диапазоне частот, но и в ограниченном диапазоне интенсивностей. Для того, чтобы волны звуковой частоты создали ощущение звука, необходимо, чтобы интенсивность превышала некоторую минимальную величину  $J_0$ , называемую **порогом слышимости**. Например, на частоте 1 кГц  $J_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  или  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ .

Максимальная интенсивность колебаний, воспринимаемая субъективно как звук, при повышении которой возникает ощущение боли, называется **порогом болевого ощущения** ( $J_{\text{max}} = 10 \text{ Вт/м}^2$  или  $P_{\text{max}} = 60 \text{ Па}$ ). Отношение  $\frac{J_{\text{max}}}{J_0} = 10^{13}$ . Поскольку диапазон интенсивностей, воспринимаемых звуков довольно велик, удобно пользоваться **логарифмической шкалой**. В связи с этим введена величина: **уровень интенсивности звука, который равен десятичному логарифму отношения интенсивности исследуемого звука  $J$  к интенсивности  $J_0$  на пороге слышимости:**

$$L_{\text{б}} = \lg \frac{J}{J_0} . \quad (2.3)$$

В этой шкале уровень интенсивности выражают в **белах (Б)**. Т.е., размерность уровня интенсивности звука  $[L] = \text{Б}$ . **Бел** – единица, получившая своё название в честь изобретателя телефона Александра Гейма Белла (1847-1922 гг.)

Если уровень интенсивности некоторого звука  $L = 1 \text{ Б}$ , то отношение его интенсивности  $J$  к  $J_0$  будет равно 10 ( $\lg 10 = 1$ ), если же  $L = 2 \text{ Б}$ , то  $\frac{J}{J_0} = 10^2$  ( $\lg 10^2 = 2$ ) и т.д. Бел – это довольно большая единица, поэтому обычно применяют единицу в 10 раз меньшую, называемую **децибелом (дБ)**:  $1 \text{ Б} = 10 \text{ дБ}$ , тогда уровень интенсивности, выраженный в децибелах:

$$L_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{J}{J_0} , \quad (2.4)$$

или  $L_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{P}{P_0}$ . Порог слышимости  $J_0$  имеет уровень интенсивности  $L = 0 \text{ дБ}$ , а болевой порог – 130 дБ. Например:

$$L_{\text{min}} \approx 1 \text{ дБ}; \quad L_{\text{шепот}} \approx 10 \text{ дБ}; \quad L_{\text{речь}} \approx 60 \text{ дБ}; \quad L_{\text{самолёт}} \approx 120 \text{ дБ}.$$

Как уже было сказано, интенсивность волны (2.2) определяется звуковым амплитудным давлением и *произведение  $pv$ , называется акустическим сопротивлением среды* и характеризует рассеяние энергии волны в акустическом поле.

Примеры волнового сопротивления некоторых веществ при  $20^\circ \text{C}$ : воздух -  $440 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; вода -  $144 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; мозг -  $160 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; мышцы -  $154 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; кости -  $622 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Колебание звуковой волны воспринимает улитка, в которой находится 10000 волокон, каждое из которых имеет свою резонансную частоту. Таким образом: **Механизм слухового ощущения – это резонансный механизм!**

Звук, доходя до органов слуха, вызывает ощущение слуха, то есть звук имеет и физиологические характеристики, которые являются отражением физических характеристик: высота звука, тембр, громкость.

**Высота звука** – субъективная характеристика, обусловленная, прежде всего частотой основного тона. Чем больше частота, тем выше тон.

**Основным тоном сложного музыкального звука** называется тон, соответствующей наименьшей частоте в его спектре.

Тоны, соответствующие остальным частотам спектра, называются **обертнами**. Если частоты обертона кратны частоте  $\nu_0$  основного тона, то обертоны называются гармоническими, причём обертон с наименьшей частотой называется первой гармоникой, обертон со следующей по величине частотой – второй гармоникой и т.д.

Музыкальные звуки с одним и тем же основным тоном могут различаться

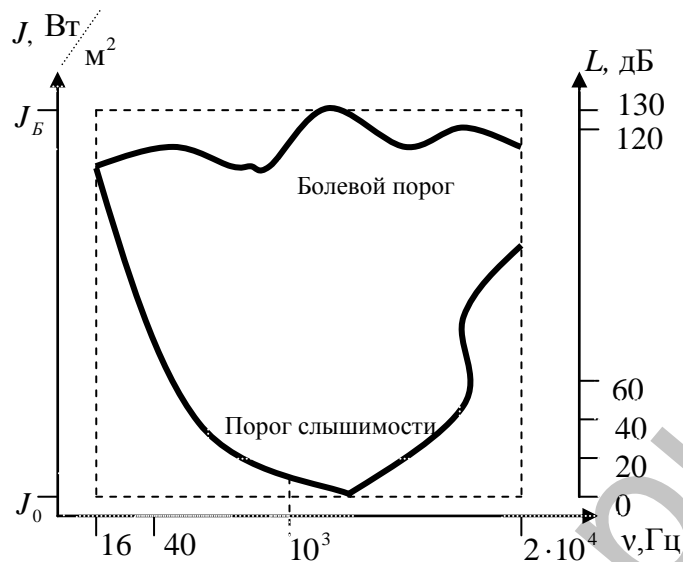


Рис.2.1

**тембром**, который определяется спектральным составом сложного звука – их частотами и амплитудами, их спадающими в конце звучания. Например, ухо различает одну и ту же мелодию, воспроизводимую на разных музыкальных инструментах.

**Громкость звука** – субъективная оценка звука, которая характеризует уровень слухового ощущения. Она зависит, прежде всего, от интенсивности и частоты звука.

Рассмотрим зависимость чувствительности уха от частоты (Рис.2.1). Если бы

чувствительность уха была одинаковой для звуков разной частоты, то область слышимости на графике зависимости воспринимаемой интенсивности от частоты звука была бы прямоугольником (на рис. – пунктирный прямоугольник). Однако, ухо человека и животных не одинаково чувствительно к различным частотам при одной и той же интенсивности. Способность воспринимать высокочастотные звуки ухудшается с возрастом. Молодой человек может слышать звуки с частотой до 20000 Гц, но уже в среднем возрасте тот же человек не способен воспринимать звуки с частотой выше 12-14 Гц. В пределах частоты 1000-3000 Гц чувствительность наибольшая. Она снижается к частоте 16 Гц и 20 Гц. Болевой порог тоже не одинаков для разных частот. В результате область слышимости ограничена как сверху, так и снизу причудливыми кривыми.

Исследования последних лет показали, что области слышимости у крупного рогатого скота и у кур мало отличаются от области слышимости у человека. Однако у многих животных области слышимости значительно сдвинуты вправо, то есть в сторону более высоких частот. Так собаки воспринимают частоты до 30 кГц, комары и летучие мыши до 60 кГц и более.

Громкость звука зависит от его интенсивности и имеет сложный характер, обусловленный чувствительностью уха к действию звуковых волн. Человек может только приблизительно оценить абсолютную интенсивность ощущения, но достаточно точно устанавливает разницу при сравнении двух ощущений различной интенсивности. Это послужило появлению сравнительного метода измерения громкости. При этом измеряют не абсолютную величину громкости, а соотношение её с некоторой другой величиной, которая принята за нулевой уровень гром-

кости с частотой 1000 Гц. Сравнительный метод был применён и при измерении интенсивности (силы) звука. Поэтому имеются две шкалы: одна для измерения уровня интенсивности; вторая - для измерения уровня громкости. В основе создания шкалы уровней громкости лежит **психофизический закон Вебера-Фехнера**: *уровень громкости данного звука (при определённой частоте колебаний) прямо пропорционален десятичному логарифму отношения его интенсивности  $J$  к значению  $J_0$ , соответствующему порогу слышимости*:

$$E_{\phi} = KL = K \lg \frac{J}{J_0}, \quad (2.5)$$

где  $L$  - уровень интенсивности,  $\frac{J}{J_0}$  - относительная сила раздражения,  $K$  - коэффициент

пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности, принятый равный единице для частоты  $\nu = 1000$  Гц. Следовательно, если принять  $K=1$  на всех частотах, то согласно (2.3) и (2.4) мы получим шкалу уровней интенсивностей; при  $K \neq 1$  - шкалу громкости, где единицей измерения будет уже не децибел, а фон. Учитывая, что при частоте в 1000 Гц шкалы уровней громкости и интенсивности совпадают, значит:  $E_{\phi} = 10 \lg \frac{J}{J_0}$  и  $E_{\phi} = 20 \lg \frac{P}{P_0}$ . (2.6)

Для того, чтобы найти соответствие между громкостью и интенсивностью звука на разных частотах, пользуются кривыми равной громкости (Рис.2.2). Кривые построены на основании средних данных, которые были у людей с нормальным слухом. Нижняя кривая соответствует порогу слышимости, то есть для всех частот  $E_{\phi} = 0$  (для частоты  $\nu = 1000$  Гц интенсивность  $J_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ). Исследование остроты звука называется **аудиометрия**. С помощью прибора аудиометра определяют порог слухового ощущения на разных частотах. Полученный график называют **аудиограммой**, который затем сравнивают с нормальной кривой порога слышимости.

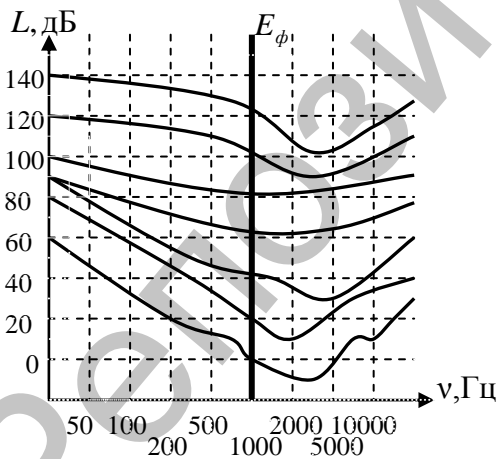


Рис. 2.2

Звуковые явления сопровождают ряд процессов, происходящих в организме, поэтому звук может быть и источником информации о состоянии внутренних органов: сердца, лёгких и других.

Непосредственное выслушивание звуков, возникающих внутри организма, составляют один из важнейших приёмов клинического исследования, и называется **аускультация** (выслушивание). Для этой цели используют стетоскоп или фонендоскоп. **Стетоскоп** - прибор в виде деревянной или пластмассовой трубки с небольшим раструбом на одном конце и плоским основанием на другом для прикладывания к уху. **Фонендоскоп** - прибор, состоящий из полой капсулы с мембраной, прикладываемой к телу больного, от капсулы идут две резиновые трубки, которые вставляются в уши врача.

Для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы применяется метод - **фонокардиография (ФКГ)** - графическая регистрация тонов и шумов сердца с целью их диагностической интерпретации. Запись производится с помо-

щью фонокардиографа, состоящего из микрофона, усилителя, системы частотных фильтров и регистрирующего устройства.

Отличным от двух указанных методов является **перкуссия** – метод исследования внутренних органов посредством постукивания по поверхности тела и анализа возникающих при этом звуков. Характер этих звуков зависит от способа постукивания и свойств (плотности, упругости, наличия полостей) тканей, находящихся вблизи места, по которому производится постукивание. По тону перкуторных звуков определяют состояние и топографию внутренних органов.

По своей природе **ультразвук (УЗ)**, как и звук, является механической волной, распространяющейся в упругой среде. Скорости распространения звуковых и ультразвуковых волн примерно одинаковы. Однако длина волны УЗ значительно меньше, чем звука, что позволяет легко сфокусировать УЗ колебания. Ультразвуковая волна обладает значительно большей интенсивностью, чем звуковая, а жидкости и твёрдые тела представляют собой хорошие проводники УЗ.

Медико-биологическое действие УЗ весьма разнообразно и не всегда легко выделить из многочисленных его эффектов основной. Тем не менее, было установлено, что при облучении УЗ биологических объектов проявляются следующие его действия: тепловое, механическое и физико-химическое.

- **Тепловое действие УЗ** имеет важное значение, т. к. процессам обмена веществ в биосистемах свойственна температурная зависимость. Тепловой эффект определяется поглощённой энергией, которая вызывает расширение тканей, кровеносных сосудов, в результате чего усиливается обмен веществ, наблюдается усиление кровотока. При этом используются небольшие интенсивности УЗ (около  $1 \text{ Вт/см}^2$ ). Благодаря тепловому действию сфокусированного УЗ, его можно использовать в качестве скальпеля для резки не только мягких тканей, но и костной

ткани, как паяльник для сваривания повреждённых или трансплантируемых костных тканей.

- **Механическое действие УЗ.** Механические колебания частиц вещества в ультразвуковом поле могут вызывать положительный эффект (микромассаж тканевых структур). И микровибрации на клеточном и субклеточном уровне, разрушение биомакромолекул, разрушение микроорганизмов грибков, вирусов, злокачественных опухолей, камней в мочевом пузыре и почках. УЗ используется для дробления веществ, например, при изготовлении аэрозолей, высокодисперсных лекарственных эмульсий, коллоидных растворов. Путём разрушения растительных и животных клеток из них выделяют биологически активные вещества (токсины, ферменты). УЗ вызывает повреждение клеточных мембран, нарушает их проницаемость.

- **Физико-химическое действие УЗ.** В УЗ поле могут протекать как окислительные, так и восстановительные реакции, причём даже такие, которые в обычных условиях не осуществимы. Одной из характерных реакций является расщепление молекул воды на радикалы  $H^{\cdot}$  и  $OH^{\cdot}$  с последующим образованием перекиси водорода  $H_2O_2$  и некоторых жирных кислот.

Медико-биологическое приложение УЗ можно разделить в основном на два направления: **диагностика** и **терапия**.

- К первому относятся локационные методы с использованием главным образом импульсного излучения, который основан на отражении УЗ от границы раздела сред с различной плотностью. Это **эхоэнцефалография** – определение опухолей и отёков мозга, **ультразвуковая кардиография** – измерение размеров

сердца в динамике, в **офтальмологии** – определение размеров глазных сред и другие.

▪ Ко второму направлению относится ультразвуковая терапия. На практике применяются УЗ с частотой 800 Гц и интенсивностью 1 Вт/см<sup>2</sup> и меньше. Причём первичными механизмами влияния являются механическое и тепловое действие на ткань.

**Инфразвуком (ИЗ)** называют звуковые колебания с частотой от 0 до 16 Гц. Источниками ИЗ являются движение морской или речной воды, шум леса, ветра, землетрясение и обвалы, колебания фундаментов зданий, стоков, деревьев, столбов и т.д.

Характерным свойством ИЗ является его малая поглощаемость средами. Поэтому он распространяется на большие расстояния. Скорость ИЗ - волн в воде 6000 км/ч, в воздухе – 1200 км/ч. По измеренным ИЗ колебаниям прогнозируют цунами, землетрясения, вулканические извержения, шторм за несколько часов до их наступления.

Инфразвуковые колебания обладают биологической активностью, которая объясняется совпадением их частоты 7 Гц с альфа ритмом головного мозга. Такой ИЗ даже при небольших интенсивностях вызывает расстройство органов зрения, тошноту, общую слабость. При средних мощностях (140÷155 дБ) регистрируют обмороки, временную потерю зрения, а при ещё больших мощностях (порядка 180 дБ) параличи, приводящие к смертельным поражениям. Механизм действия ИЗ имеет резонансную природу.

В промышленном животноводстве животные подвергаются значительным инфразвуковым облучениям, которые создают электродвигатели, компрессоры, электродоилки. Нет сомнения, что ИЗ оказывает отрицательное влияние на молокоотдачу и на многие физиологические функции сельскохозяйственных животных. Изучению, а также устранению этого влияния должны быть посвящены усилия многих исследователей и ветеринарных врачей.

### **№3. Движение крови в сосудистой системе. Работа сердца**

Начальное давление, необходимое для продвижения крови по всей сосудистой системе, создается работой сердца. **Сердце представляет периодически работающий нагнетательный насос**, у которого рабочая фаза — сокращение мышцы (**систола**) чередуется с фазой расслабления — отдыха мышцы (**диастола**).

Рассмотрим схематически явления, происходящие в «большом круге» кровообращения. При каждом сокращении левого желудочка сердца в аорту, уже заполненную кровью под некоторым давлением, выталкивается определенное количество крови (так называемый ударный объем, в среднем равный 60÷70 мл). Затем клапаны аорты закрываются. Поступивший в аорту дополнительный объем крови повышает давление в ней и вызывает растяжение стенок, увеличивая, таким образом, емкость сосуда. Образовавшееся при этом в аорте давление называется **систолическим**. Волна повышенного давления крови быстро распространяется вдоль артериальной части сосудистой системы и вызывает последовательное расширение ее более дистальных отделов. Эта волна называется пульсовой волной, скорость ее зависит, главным образом, от упругости сосудистых стенок и имеет величину порядка 6÷8 м/с. Таким образом:

**Пульсовая волна** – это волна упругой деформации стенок кровеносных сосудов, распространяющаяся в сердечно-сосудистой системе и несущая с собой энергию.



Затем (уже в период диастолы) стенки сосудов последовательно сокращаются до исходного положения и проталкивают поступившую в аорту кровь в последующие звенья сосудистой системы. Течение крови при этом имеет уже непрерывный характер, и скорость его составляет только  $0,3 \div 0,5$  м/с.

Упругое растяжение и затем сокращение сосудистых стенок не только создает непрерывный ток крови в сосудистой системе, но и обеспечивает экономичное использование энергии, которая развивается сердечной мышцей при ее сокращении. Энергия, развиваемая сердечной мышцей при систоле, длительность которой примерно 0,3 с, только частью передается непосредственно массе крови в аорте, превращаясь в ее кинетическую энергию. Значительная часть этой энергии затрачивается на растяжение стенок сосудов и переходит в потенциальную энергию их деформации. Эта часть энергии затем уже постепенно, по мере возвращения стенок сосудов в исходное положение передается массе крови в течение остальной части сердечного цикла — диастолы, которая продолжается примерно 0,6 с (длительность всего сердечного цикла 0,9 с), когда сердечная мышца отдыхает.

Если сравнить среднюю скорость течения крови  $0,3 \div 0,5$  м/с со скоростью распространения пульсовой волны  $6 \div 8$  м/с, то становится понятным, что «медленно» текущий ударный объем крови постоянно обгоняют все новые и новые пульсовые волны, возникающие в момент систолы. Получается, что пульсовая волна как бы «массирует» стенки кровеносных сосудов, «проталкивая» кровь в дистальные отделы сердечно-сосудистой системы. Но скорость распространения пульсовой волны зависит от способности сосудистых стенок накапливать потенциальную энергию. С возрастом, когда происходит кальцинирование стенок кровеносных сосудов (например, при атеросклерозе), сосуды становятся менее эластичными и могут хуже накапливать потенциальную энергию. Соответственно, ухудшается их способность проводить пульсовую волну, ее скорость становится меньше и, как следствие, ухудшается процесс кровообращения в организме.

Если бы сосудистые стенки были жесткими и кровь двигалась толчками, то, как показывают расчеты, на продвижение ее при том же количестве протекающей по сосудам крови потребовалась бы значительно большая энергия, чем при равномерном течении.

Течение крови в сосудистой системе в норме имеет ламинарный характер. В турбулентное оно переходит при нарушении нормальных условий, например при резком сужении просвета сосуда. Подобное явление может иметь место, в частности, при неполном открытии или при неполном закрытии сердечных или аортальных клапанов, при отложении холестерина на стенках сосудов (при ишемической болезни). При этом появляются характерные звуки, называемые сердечными шумами, которые служат одним из характерных признаков этого явления.

Прослушивание звуков, сопровождающих прохождение крови по искусственно сжатой артерии, используется, как увидим ниже, при измерении артериального давления.

Кровь - это вязкая жидкость, средняя относительная вязкость крови в норме равна  $4 \div 5$ . Поэтому, несмотря на невысокую скорость течения, ток крови в сосудистой системе встречает значительное сопротивление. В различных частях сосудистой системы оно зависит от общего просвета сосудов и количества разветвлений, по которым кровь проходит одновременно параллельными потоками. Чем больше сопротивление, тем больше падение давления крови на соответствующем участке сосудистой системы.

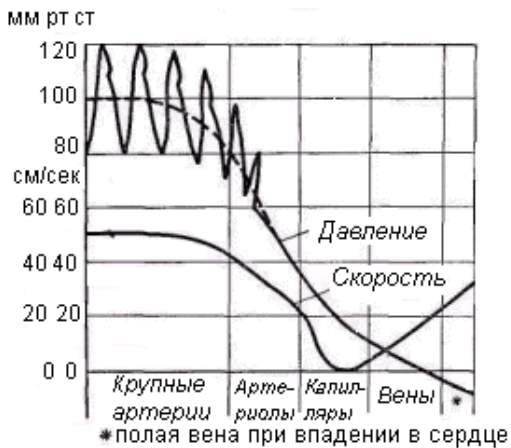


Рис.3.1

В сети венозных сосудов (Рис.3.1), площадь сечения которых в среднем в два раза больше площади сечения соответствующих артерий, скорость течения крови невысока и падение давления незначительно. В крупных венах около сердца давление становится даже на несколько миллиметров ртутного столба ниже атмосферного. Кровь в этих условиях движется под влиянием присасывающего действия грудной клетки при вдохе.

Во всех рассуждениях мы использовали закономерности движения жидкости по горизонтальным трубкам и поэтому не учитывали гидростатического да-

вления от тяжести самой жидкости. В организме сосуды располагаются в самых различных направлениях, в том числе и в вертикальном (Рис.3.2). Однако артериальные и венозные сосуды, по которым кровь двигается в противоположных направлениях, расположены большей частью параллельно и сообщаются между собой через капилляры. Поэтому в первом приближении можно считать, что гидростатическое давление крови в них, как и в сообщающихся сосудах, взаимно уравнивается и его можно не учитывать.

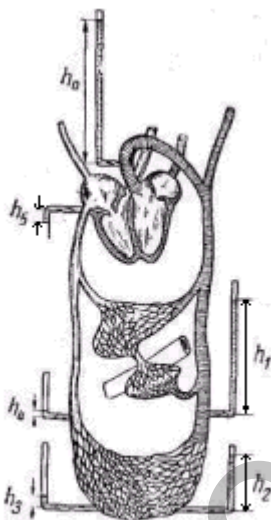


Рис.3.2

Равномерному распределению крови в отдельных частях организма (особенно в конечностях) независимо от положения их в пространстве способствуют также и физиологические механизмы, регулирующие кровообращение. Поэтому у здоровых людей даже, при резком переходе из горизонтального в вертикальное положение, распределение крови в организме практически не изменяется. Однако при некоторых условиях, например, при ослаблении эластичности их стенок, гидростатическое давление может способствовать замедлению течения или даже застою крови в венах нижних конечностей.

В норме сосудистая система замкнута и не имеет сообщения с внешней атмосферой. Такое сообщение может возникнуть при повреждении стенок сосудов, в этом случае может проявляться действие гидростатического давления крови. Общеизвестно, например, что для ослабления кровотечения из пораженной конечности ей следует придавать возвышенное положение.

Рассмотрим вопрос о расчете энергии, развиваемой при работе сердца. В основном она складывается из работы при сокращении желудочков сердца, главным образом левого (работа правого желудочка принимается равной  $0,15 \div 0,2$  от работы левого). Работа при сокращении левого желудочка затрачивается на сообщение массе выталкиваемой крови (ударный объем крови в покое сердца можно сравнить с сосудом, объемом  $V_y = 60 \text{ см}^3$ ) энергии, необходимой для его продвижения по всей сосудистой системе. Эта энергия может быть представлена формулой:

$$W_{\text{ж}} = pV_y + \frac{mv^2}{2} = pV_y + \frac{\rho v^2}{2} V_y, \quad (3.1)$$

где  $p$  - среднее давление, под которым кровь выбрасывается в аорту ( $p = 100 \text{ мм}$ ).

рт. ст.);  $\rho$  - плотность крови ( $\rho = 1,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ );  $v$  - скорость крови в аорте ( $v=0,5 \text{ м/сек}$ ). Давление  $p=100 \text{ мм. рт. ст.} = 10^5 \cdot \frac{100}{760} = 1,3 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ ;  $60 \text{ см}^3 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ .

$$\text{Тогда } W_{\text{ж}} = 1,3 \cdot 10^4 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + \frac{1,05 \cdot 10^3 \cdot 0,5^2}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-5} = 0,8 + 0,008 \approx 0,81 \text{ Дж}.$$

Учитывая работу правого желудочка, энергия сердца:  $W_c = 1,2 \cdot W_{\text{ж}} = 1,2 \cdot 0,81 = 1 \text{ Дж}$ . Время сокращения желудочков примерно  $t=0,3 \text{ с}$ . Тогда мощность, развиваемая сердцем при сокращении:  $N_c = \frac{W_c}{t} = \frac{1}{0,3} = 3,3 \text{ Вт}$ .

Считая в среднем 60 сокращений в 1 мин, работа сердца за 1 мин — 60 Дж (за 1 сутки — 86 400 Дж).

Можно учитывать также минутный объем крови  $V_m$ , равный произведению ударного объема  $V_y$  на число сокращений  $n$  сердца в 1 мин. В предыдущем случае, например,  $V_m = 60 \cdot 60 = 3600 \text{ мл/мин} = 3,6 \text{ л/мин}$ .

При мышечной работе средней интенсивности можно считать, что минутный объем крови увеличивается примерно в пять раз:  $V_m = 18 \text{ л/мин}$ . При этом, соответственно, увеличивается скорость крови в аорте  $v = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ м/с}$ , а также, соответственно, кинетическая энергия крови. В результате работа сердца увеличивается больше, чем в пять раз. При этом работа, совершаемая сердцем в 1 мин, будет:  $A_c = 1,2 \cdot \left[ 1,3 \cdot 10^4 \cdot 18 \cdot 10^{-3} + \frac{1,05 \cdot 10^3 (2,5)^2}{2} \cdot 18 \cdot 10^{-3} \right] = 1,2(234 + 61) = 354 \text{ Дж}$ .

#### №4. Капиллярные явления. Формула Борелли - Жюрена

**Капилляр** – это трубка, открытая с двух сторон, малого радиуса по сравнению с длиной трубки.

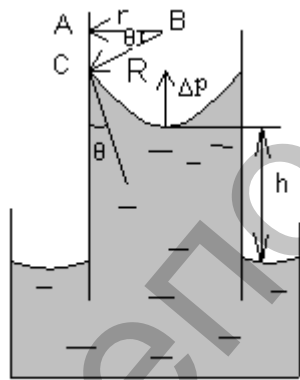


Рис. 4.1

Опустим капилляр радиуса  $r$  в смачивающую жидкость (Рис.4.1). Поверхность жидкости в капилляре полностью искривлена и называется **мениск**.

Под действием дополнительного давления  $\Delta p$  будет происходить подъем жидкости до тех пор, пока дополнительное давление не уравнивается гидростатическим давлением, обусловленным весом столба жидкости, т.е.:

$$\Delta p = p_{\text{г.ст.}} \quad (4.1)$$

$$\text{Гидростатическое давление: } p_{\text{г.ст.}} = \rho g h \quad (4.2)$$

$$\text{Дополнительное давление под сферической поверхностью мениска в капилляре } \Delta p = \frac{2\sigma}{R} \quad (4.3)$$

где  $R$  – радиус кривизны поверхности мениска жидкости.

Подставляя (4.2) и (4.3) в условие равновесия жидкости в капилляре (4.1),

$$\text{получим: } \frac{2\sigma}{R} = \rho g h \quad (4.4)$$

Откуда выразим высоту поднятия жидкости в капилляре:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \quad (4.5)$$

В полученном выражении мы знаем почти все величины:  $\sigma$  – коэффициент

поверхностного натяжения и  $\rho$  – плотность жидкости (табличные величины);  $g$  – ускорение свободного падения. Представляет неудобство для измерения только величина  $R$  – радиус кривизны поверхности мениска жидкости (как Вы «залезете» в капилляр?). Оказывается, эту проблему можно решить, если перейти от радиуса кривизны поверхности мениска к радиусу капилляра, который уже можно измерить приборами (штангенциркулем, микрометром).

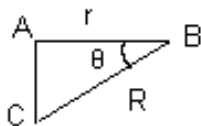


Рис.4.2

Из рис.4.1 видно, что касательная к поверхности мениска, проведенная в точке  $C$ , и боковая поверхность капилляра образуют краевой угол  $\theta$ . Построим прямоугольный треугольник  $ABC$ , где  $\angle BAC=90^\circ$ , а угол  $\angle ABC=\theta$  (т.к. касательная к поверхности мениска и радиус мениска взаимно перпендикулярны).

Рассмотрим треугольник  $ABC$  отдельно (Рис.4.2). Из геометрии известно, что косинус прилежащего угла  $\theta$  есть отношение

прилежащего катета  $r$  к гипотенузе  $R$ , т.е.:  $\cos \theta = \frac{r}{R}$ , откуда радиус мениска:

$$R = \frac{r}{\cos \theta}. \quad (4.6)$$

Подставляя (4.6) в (4.5) получим **формулу высоты поднятия или опускания жидкости в тонких трубках – капиллярах – формулу Борели - Жюрена:**

$$h = \pm \frac{2\sigma}{\rho g r} \cos \theta, \quad (4.7)$$

где знак «+» соответствует смачивающей жидкости и соответственно явлению подъема жидкости в капилляре; знак «-» соответствует не смачивающей жидкости и соответственно явлению опускания жидкости в капилляре. В заключение, мы можем сформулировать общее определение. Что же такое капиллярные явления?

**Капиллярные явления** - это явления подъема или опускания жидкости в тонких трубках – капиллярах под действие дополнительного давления.

Капиллярные явления играют огромную роль в жизни всего окружающего нас мира. Капиллярностью объясняется гигроскопичность ряда тел (вата, бинт, бетон, почва, ткань и др.) т.е., их способность впитывать влагу. В строительной практике между фундаментом (бетон) здания и спинками прокладывается слой толя, смолы и другого вещества, что препятствует проникновению влаги по стенам в жилые помещения.

По капиллярам почвы поднимается вода из глубины в плодородные слои почвы. Уменьшая диаметр почвенных капилляров путем уплотнения почвы, можно усилить приток воды к поверхности (зона испарения), и тем самым ускорить высушивание почвы. Наоборот, разрыхляя поверхность почвы и создавая прерывистость в системе почвенных капилляров, можно задерживать приток воды к зоне испарения. На этом основаны агротехнические приемы регулирования водного режима почвы – прокатка и боронование.

## №5. Дисперсия света. Спектры. Понятие о спектральном анализе

**Дисперсия света** – это зависимость показателя преломления вещества  $n$  от длины световой волны (или от частоты). Различают два вида дисперсии (Рис.5.1):

**Нормальная дисперсия**, при которой показатель преломления обратно пропорционален длине волны. Нормальная дисперсия наблюдается в прозрачных средах (вода, стекло). **Аномальная дисперсия**, при которой показатель прелом-

ления прямо пропорционален длине волны. Аномальная дисперсия наблюдается в мутных средах (например, коллоидных растворах).



Рис. 5.1

Рассмотрим случай нормальной дисперсии, когда на стеклянную призму падает белый свет (Рис.5.2). За счет дисперсии лучи с разной длиной волны будут по-разному преломляться в стекле. Действительно, световые лучи, имеющие максимальную длину волны – лучи красного цвета  $\lambda_{кр}$  (Рис.5.3) имеют наименьший показатель преломления  $n_{кр}$  и отклоняются на небольшой угол от первоначального направления распространения. А световые лучи, имеющие минимальную длину волны – лучи фиолетового цвета  $\lambda_{ф}$ , характеризуются наибольшим показателем преломления  $n_{ф}$  и отклоняются на наибольший угол. В результате на экране наблюдается спектр нормальной дисперсии (который мы будем видеть в виде радуги).

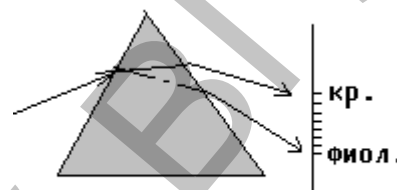


Рис. 5.2

Экспериментально могут быть получены спектры излучения и спектры поглощения вещества. Спектры излучения получают, пропуская свет, излучаемый веществом, через призму. Различают спектры излучения:

- 1) линейчатые, которые дают атомы в возбужденном состоянии;
- 2) полосатые, которые дают молекулы в возбужденном состоянии. Молекулярная полоса состоит из линий излучения атомов;
- 3) сплошные или непрерывные, которые излучают тела, нагретые до высокой температуры (например, раскаленная вольфрамовая нить в лампе накаливания).

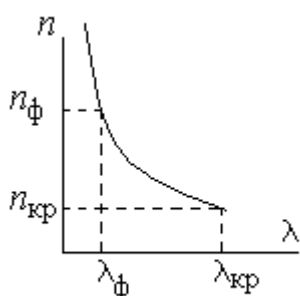


Рис. 5.3

Для всех элементов таблицы Менделеева экспериментально определены линии излучения атомов и молекул, которые сведены в справочные таблицы эталонов, используя которые можно, например, сжигая какое-то неизвестное вещество и, пропуская свет от его пламени через призму, получить линии излучения тех атомов, которые входят в его состав. На этом принципе основан

один из самых точных методов качественного и количественного химического анализа – **метод спектрального анализа вещества**.

Пропуская белый свет через газы, молекулы которого будут поглощать световые лучи той же длины волны, которые они сами могут излучать, на экране мы увидим **спектр поглощения**: на фоне непрерывного спектра излучения белого света будут наблюдаться темные линии поглощения тех атомов и молекул, которые входят в состав газа.

## №6. Тепловое излучение

**Тепловое излучение** – это электромагнитное излучение, создаваемое атомами и молекулами в тепловом хаотическом движении. Для характеристики способности тел излучать или поглощать энергию вводят понятия:

**Излучательная способность тела:** 
$$R = \frac{W}{S \cdot t} \quad (6.1)$$

- это энергия, излучаемая телом с единицы площади поверхности за единицу времени. Ее размерность:  $R = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

**Поглощательная способность**

$$A = \frac{W_{\text{погл.}}}{W_{\text{пад.}}} \quad (6.2)$$

- это отношение поглощенной телом энергии к энергии, падающей на него. Любое тело поглощает не всю энергию, падающую на него:  $W_{\text{погл.}} < W_{\text{пад.}}$ . Часть энергии отражается. Поэтому, для любого тела поглощательная способность будет меньше единицы:  $A_{\text{люб. тела}} < 1$ . Например, поглощательная способность: для зрачка глаза -  $A=0,97$ ; для окна -  $A=0,94$ ; для сажи -  $A=0,92$ ; для кожи животных -  $A=0,65$ . Существует модель, называемая **абсолютно черное тело (АЧТ)**, которое поглощает всю падающую на него энергию. Тогда поглощательная способность АЧТ  $A_{\text{АЧТ}} = 1$ .

В некоторый момент времени, при поглощении энергии, тело настолько нагреется, что начнет само излучать энергию в виде электромагнитных волн. Состояние тела, при котором оно излучает такое же количество энергии, какое поглощает, называется **состоянием термодинамического равновесия**. В состоянии термодинамического равновесия выполняется **закон Киргофа**:

$$\frac{R_1}{A_1} = \frac{R_2}{A_2} = \dots = \frac{R_{\text{АЧТ}}}{A_{\text{АЧТ}}} = R_{\text{АЧТ}} \quad (6.3)$$

отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности для любого тела есть величина постоянная, равная излучательной способности АЧТ при данной температуре.

Тогда, излучательная способность любого тела:  $R = R_{\text{АЧТ}} \cdot A$ . (6.4)

Таким образом, для того, чтобы вычислить излучательную способность любого нагретого тела, необходимо знать излучательную способность АЧТ при данной температуре. Излучательная способность АЧТ определяется по **закону Стефана – Больцмана**: излучательная способность тела зависит только от его температуры в четвертой степени

$$R_{\text{АЧТ}} = \sigma \cdot T^4, \quad (6.5)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$  - постоянная Стефана-Больцмана.

Подставляя (6.5) в (6.4), получим излучательную способность любого тела:

$$R = \sigma \cdot T^4 \cdot A. \quad (6.6)$$

Используя определение излучательной способности (6.1), можно найти энергию, излученную телом:

$$W = R \cdot S \cdot t. \quad (6.7)$$

Подставляя в (6.7) выражение (6.6), получим:

$$W = A \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S \cdot t. \quad (6.8)$$

Используя выражение (6.8), мы можем вычислить количество энергии, которое теряет любое тело, излучая электромагнитное излучение через свою поверхность  $S$  за время  $t$ . В частности, таким образом, мы можем рассчитать энергетические потери живого организма за счет электромагнитного излучения, принимая площадь поверхности тела человека, например, равной  $1,2 \text{ м}^2$ .

Тепловое излучение излучается в виде электромагнитных волн (ЭМВ). По **закону Вина**: длина волны, на которую приходится максимум излучаемой телом энергии обратно пропорциональна температуре тела:

$$\lambda = \frac{b}{T}, \quad (6.9)$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м К}$  – постоянная Вина.

Зная длину волны, которую излучает нагретое тело, можно определить его температуру. Например, максимум излучаемой Солнцем энергии, приходится на

длину волны зеленого цвета  $\lambda_{\max} = 550 \text{ нм}$ . Тогда, температура поверхности

$$\text{Солнца: } T = \frac{b}{\lambda} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}}{550 \cdot 10^{-9} \text{ м}} \approx 6000 \text{ К}$$

**Тепловое излучение** – это ЭМИ, относящееся к диапазону ИК - излучения (ЭМИ в диапазоне длин волн от 760 нм до 100 мкм). ИК - излучение используется в медицинской практике для прогревания. Источники ИК – излучения, применяемые в терапевтической практике - лампы Минина или лампы инфрауш.

## №7. Строение атома

Согласно **ядерной модели Резерфорда**, атом представляет собой систему, состоящую из массивного, положительно заряженного ядра, вокруг которого по эллиптическим орбитам движутся отрицательно заряженные электроны. Эта модель называется **планетарной моделью атома**, так как она схожа со строением солнечной системы. Но данная теоретическая модель имеет несколько недостатков – противоречий с реальностью.

**Первое противоречие.** В соответствии с классической электродинамикой, движущаяся с ускорением заряженная частица должна непрерывно излучать электромагнитные волны, т.е., электрон на орбите будет постоянно терять энергию в результате излучения электромагнитных волн. Это значит, что электрон, потеряв всю энергию, неминуемо упадет на ядро и атом прекратит свое существование. Расчеты показывают, что время жизни такого атома составит порядка  $10^{-12}$  секунды. Но, в действительности, многие атомы живут миллионы лет. Таким образом, возникает первое противоречие между теорией и действительностью.

**Второе противоречие.** Излучая электромагнитные волны, электрон теряет свою энергию. Это значит, что частота излучаемой волны должна уменьшаться и длина волны соответственно увеличиваться. Тогда можно сделать вывод о том, что *спектр излучения атома должен быть сплошным* (т.е. в нем должны присутствовать всевозможные длины волн). На самом деле, *спектр излучения атома является линейчатым* (т.е. атом определенного химического элемента излучает строго определенные длины волн).

Для устранения этих противоречий датским физиком Нильсом Бором были сформулированы **три постулата** (постулат – это интуитивное утверждение, принимаемое без доказательства на основе здравого смысла):

1. Атом находится в стационарных состояниях с определенными дискретными значениями энергии, в которых он не излучает и не поглощает энергию.
2. Излучение и поглощение энергии атомом сопровождается его переходом из одного энергетического состояния в другое и определяется правилом частот:

$$h\nu = W_k - W_n, \quad (7.1)$$

где  $W_k$  и  $W_n$  – энергия атома в начальном и конечном стационарном состоянии;  $h$  - постоянная Планка;  $\nu$  - частота, излучаемого атомом кванта света.

3. В стационарном состоянии электроны в атоме находятся на вполне определенных орбитах, на которых момент импульса электрона кратен постоянной Планка:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (7.2)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  **главное квантовое число** (номер периода в периодической системе элементов Д.И. Менделеева),  $r$  – радиус орбиты электрона,  $m$  – масса электрона,  $v$  – скорость электрона.

Используя предложенные постулаты, можно получить условия квантования радиусов орбит и энергии электрона в атоме.

### 3.1. Условие квантования радиусов орбит электронов в атоме

Рассмотрим строение атома на простейшей модели атома водорода, который состоит из атомного ядра и одного электрона. Так как электрон заряжен отрицательно, а ядро атома положительно, то между ними действует сила притяжения (сила Кулона) (Рис.7.1). Под действием этой силы  $F_k$  электрон движется по орбите с центростремительным ускорением  $a_{ц.с.}$ .

По второму закону Ньютона получим:  $F_k = ma_{ц.с.}$ , где центростремительное

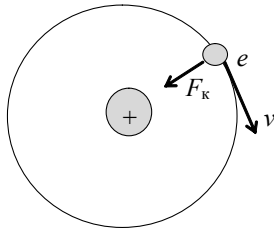


Рис.7.1

ускорение  $a_{ц.с.} = \frac{v^2}{r}$ .

Таким образом, получим:  $F_k = \frac{mv^2}{r}$ . (7.3)

По закону Кулона:  $F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$ .

Учитывая, что заряд электрона  $|q_1|=e$  и заряд ядра атома водорода  $|q_2|=e$ , то:

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2}, \quad (7.4)$$

где  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд (заряд электрона).

Подставим (7.4) в (7.3):  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ . (7.5)

Скорость электрона на орбите выразим из третьего постулата Бора:

$$v = \frac{nh}{2\pi mr} \quad (7.6)$$

Подставим (7.6) в (7.5):  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = \frac{m}{r} \cdot \left( \frac{nh}{2\pi mr} \right)^2$ .

Откуда получим **формулу для радиуса орбиты электрона в атоме:**

$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \quad (7.7)$$

Рассмотрим разные орбиты электрона:

Если  $n=1$ , то  $r_1 = 1^2 \cdot \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$ ;

Вычислим радиус первой боровской орбиты:

$$r_1 = 1^2 \cdot \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}^2}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}^2} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,5 \text{ \AA}$$

Для обозначения степени числа  $10^{-10}$  м – характерного радиуса орбиты электрона в атоме используется внесистемная единица длины  $\text{\AA}$ , называемая **Ангстрем**.

Если  $n = 2$ , то  $r_2 = 2^2 \cdot \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 4 \cdot \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 2^2 \cdot r_1$ .

Т.е., радиус второй орбиты  $r_2 = 4r_1$  больше радиуса первой орбиты в четы-



ре раза.

$$\text{Если } n = 3, \text{ то } r_3 = 3^2 \cdot \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 9 \cdot \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 3^2 \cdot r_1.$$

Т.е., радиус третьей орбиты  $r_3 = 9r_1$  больше радиуса первой орбиты в девять раз. Аналогично:  $r_4 = 16r_1$ ;  $r_5 = 25r_1$ ;  $r_6 = 36r_1$ ;  $r_7 = 49r_1$ ; .....  $r_n = n^2 \cdot r_1$ .

Учитывая, что выражение  $\frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$  - это не что иное, как радиус первой боровской орбиты  $r_1 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0,5 \text{ \AA}$ , то радиус любой орбиты электрона в атоме можно выразить через радиус его первой боровской орбиты.

Таким образом, мы получим **условие квантования радиусов орбит электронов в атоме:**

$$r_n = n^2 \cdot r_1 \quad (7.8)$$

т.е., радиус орбиты электрона в атоме увеличивается как квадрат главного квантового числа.

Схематично, расположение первых четырех атомных орбит изображено на рис. 7.2. Удивительно, но факт, что радиусы орбит электронов в атоме увеличиваются как  $n^2$ . Сравним этот факт с информацией о строении электронных орбиталей, знакомой вам из курса неорганической химии. Тогда можно понять, что такая «ажурная» структура строения атома связана с тем, что с увеличением главного квантового числа (номера периода) увеличивается и количество электронов на внешней орбитали.

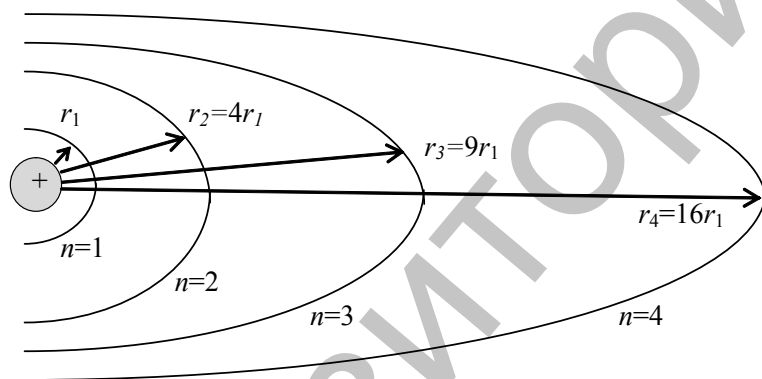


Рис.7.2

Например, у элементов 1-го периода таблицы Д.И. Менделеева ( $n=1$ ) электронная орбиталь имеет вид  $s$ -облака. У элементов 2-го периода, кроме  $1s^2$  электронов, уже на втором энергетическом уровне ( $n=2$ ) возможно существование электронов как в  $2s^2$ , так и в  $2p^6$  состояниях. Электроны атомов 3-го периода таблицы Д.И. Менделеева ( $n=3$ ) располагаются соответственно, как на  $1s^2$ ,  $2s^2$ ,  $2p^6$ ,  $3s^2$ ,  $3p^6$  орбиталях, так и возможно существование электронов уже и в  $3d^{10}$  состоянии. Поэтому, на первом уровне может находиться только 2, на втором 8, на третьем 18 электронов. Т.к. количество электронов с увеличением номера уровня увеличивается, то увеличивается и сила их кулоновского отталкивания друг от друга, за счет которой расстояние между орбиталями увеличивается. Одновременно, такое кулоновское отталкивание электронных орбиталей друг от друга компенсируется силой кулоновского притяжения электронов и положительно заряженного ядра. Таким образом, за счет «конкуренции» кулоновских сил отталкивания орбиталей и притяжения положительного ядра и формируется такая устойчивая и «ажурная» система как атом.

### 3.2. Условие квантования энергии электронов в атоме

Электрон, движущийся на орбите, обладает кинетической и потенциальной энергией. Кинетическая энергия – это энергия движения, а потенциальная энергия – это энергия, которой обладает электрон в электрическом поле положительно заряженного ядра. Тогда его полная энергия:

$$W = W_k + W_p. \quad (7.9)$$

Опуская довольно сложный вывод формулы, приводим выражение для энергии электрона на орбите:

$$W = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2}. \quad (7.10)$$

Рассмотрим изменение энергии электрона в зависимости от главного квантового числа  $n$  – номера энергетического уровня:

Если  $n = 1$ , то энергия  $\bar{e}$  на 1-м уровне:  $W_1 = -\frac{1}{1^2} \cdot \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2} = -\frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2}$ .

Если  $n = 2$ , то энергия  $\bar{e}$  на 2-м уровне:  $W_2 = -\frac{1}{2^2} \cdot \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2} = -\frac{1}{4} \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2} = \frac{1}{4} W_1$ .

Если  $n = 3$ , то энергия  $\bar{e}$  на 3-м уровне:  $W_3 = -\frac{1}{3^2} \cdot \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2} = -\frac{1}{9} \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^2} = \frac{1}{9} W_1$ .

Аналогично, энергия электрона на 4-м, 5-м, 6-м и 7-м уровнях, соответственно:  $\frac{1}{9} W_1$ ;  $\frac{1}{16} W_1$ ;  $\frac{1}{25} W_1$ ;  $\frac{1}{36} W_1$ ;  $\frac{1}{49} W_1$ ; .....  $\frac{1}{n^2} W_1$ .

Так как в формуле (7.10)  $\epsilon_0$ ,  $h$ ,  $m$ ,  $e$  – это постоянные величины, то можно сделать вывод, что энергия электрона зависит только от величины  $\frac{1}{n^2}$ , т.е., обратна пропорциональна квадрату главного квантового числа. Однако, если учесть стоящий в формуле (7.10) знак «минус» – это значит, что энергия электрона в атоме отрицательна, то можно сформулировать **условие квантования энергии электрона в атоме**: энергия электрона в атоме увеличивается обратно пропорционально квадрату главного квантового числа (увеличение энергии происходит, потому что энергия электрона в атоме отрицательна):

$$W_n = \frac{1}{n^2} W_1. \quad (7.11)$$

На рис. 7.3 схематически приведен энергетический спектр атома для пяти энергетических уровней. Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что на второй орбите энергия электрона в 4 раза больше чем на первой, а на 3-й в 9 раз больше чем на 1-й и т.д. Это значит, что при переходе электрона на более высокую орбиту его энергия должна увеличиться, а это возможно, только если атом поглотит квант энергии из окружающей среды. Если электрон переходит с более высокой орбиты на низкую, то его энергия уменьшается и при этом атом излучает квант энергии в окружающую среду.

Если подставить выражение (7.10) для энергии электрона во второй постулат Бора (7.1), то получим правило отбора частот:

$$\nu = R \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (7.12)$$

где  $R = \frac{e^4 m}{\epsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  – постоянная Ридберга;  $k$  – номер орбиты, с которой переходит электрон;  $n$  – номер орбиты, на которую переходит электрон.

**Правило отбора частот:** частота электромагнитной волны (фотона или кванта), излученной атомом при переходе электрона с одной орбиты на другую, зависит только от номеров орбит, с которой и на которую переходит электрон.

В зависимости от перехода электронов в атоме возможны три вида излуче-

ния атомов (Рис.7.3):

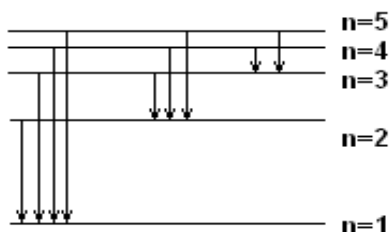


Рис.7.3

1. Электрон переходит на  $n=1$  - первую орбиту с более высоких  $k = 2, 3, 4, 5$  и т.д. При этом атом излучает в ультрафиолетовом диапазоне, и эти переходы называются – **серия Лаймана**.
2. Электрон переходит на  $n=2$  - вторую орбиту с более высоких  $k = 3, 4, 5$  и т.д. При этом атом излучает видимый свет, и эти переходы называются – **серия Бальмера**.
3. Электрон переходит на  $n=3$  - третью орбиту с более высоких  $k = 4, 5$  и т.д. При этом атом излучает в инфракрасном диапазоне, и эти переходы называются – **серия Пашена**.

## №8. Рентгеновское излучение и его биологическое действие

**Рентгеновское излучение** – это электромагнитное излучение в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,0001 \div 1$  нм. По способу возбуждения рентгеновское излучение разделяется на **тормозное** и **характеристическое**.

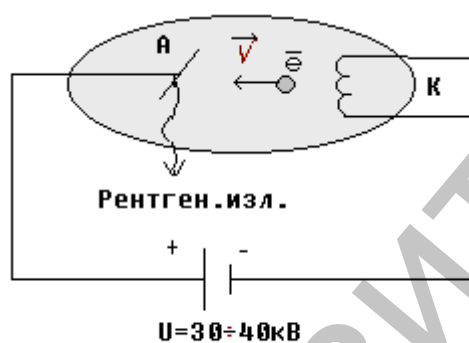


Рис. 8.1

Тормозное рентгеновское излучение возникает при быстром торможении электронов, ускоренных до больших скоростей под действием высокой разности потенциалов.

Для получения рентгеновского излучения используется рентгеновская трубка (Рис.8.1), которая представляет собой герметически запаянный сосуд, из которого откачан воздух, т.е., внутри трубки - вакуум. С разогреваемого катода **К** за счет термоэлектронной эмиссии вырываются

электроны, которые под действием высокого напряжения  $U=30 \div 40$  кВ приобретают высокую скорость и резко тормозятся на аноде **А**, поверхность которого расположена под углом  $45^\circ$  к оси трубки. В момент торможения электрон должен отдать свою энергию на теплоту или на излучение. Решим задачу о нахождении длины волны рентгеновского излучения, которую излучает электрон при резком торможении на аноде с точки зрения закона сохранения энергии.

Действительно, электрон, который «вышел» из катода за счет термоэлектронной эмиссии вначале имеет нулевую скорость. На него начинает действовать внешнее электрическое поле, созданное между катодом и анодом (отрицательный электрон движется к положительному аноду). Электрическое поле совершает работу по перемещению заряда  $A_{эл.поля} = e \cdot \Delta\phi = e \cdot U$ , (8.1)

где  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $\Delta\phi \equiv U$  - разность потенциалов или электрическое напряжение.

Работа (8.1), которую совершило электрическое поле, затрачивается на

увеличение кинетической энергии электрона от 0 до  $\frac{mv^2}{2}$ . Следовательно:

$$e \cdot U = \frac{mv^2}{2} \quad (8.2)$$

В момент удара об анод электрон должен остановиться, т.е., его скорость должна стать равной нулю. Но тогда и его кинетическая энергия тоже должна стать равной нулю. По закону сохранения энергии энергия не может бесследно исчезнуть. Значит, она должна перейти в какие-то другие формы энергии.

Действительно, при ударе об анод электрон передает часть своей энергии атомам самого анода. При этом увеличивается энергия этих атомов и, соответственно, анод сильно нагревается. Температура анода увеличивается до  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , при которой сам анод начнет плавиться, т.е., рентгеновская трубка выйдет из строя. Чтобы этого не произошло, анод рентгеновской трубки делают полым внутри, где циркулирует охлаждающая его вода.

При торможении электрон может «сбросить с себя» энергию в виде коротковолнового рентгеновского излучения. Действительно, излучая энергию (8.2) в виде кванта электромагнитного излучения, эта энергия переходит в энергию фотона:

$$W_\phi = h \cdot \nu, \quad (8.3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота рентгеновского фотона.

Приравнивая (8.2) и (8.3), получим:  $e \cdot U = h \cdot \nu$ .

Откуда можно найти частоту рентгеновского фотона:  $\nu = \frac{e \cdot U}{h}$ . (8.4)

Используя соотношения между скоростью света  $c$ , длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ :  $c = \lambda \cdot \nu$ , получим выражение для длины волны:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ .

Подставляя в него (8.4), найдем длину волны рентгеновского излучения:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}. \quad (8.5)$$

Такое рентгеновское излучение, которое получается за счет резкого торможения ускоренных электронов, называется **тормозным рентгеновским излучением**. Однако электроны летят к аноду с разными скоростями; часть энергии электрон передает аноду и эта энергия идет на разогревание анода. Поэтому, выражение (8.6) – это идеальный случай, когда вся энергия электрона полностью превратилась в энергию электромагнитного рентгеновского излучения. Выражение (8.6) позволяет нам вычислить минимальную длину волны – так называемую **коротковолновую границу тормозного рентгеновского излучения**:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}. \quad (8.7)$$

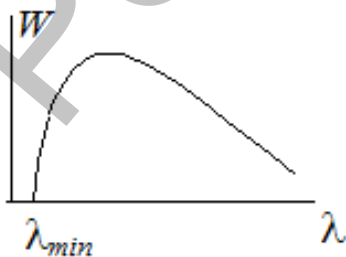


Рис. 8.2

Т.к. величины  $h$ ,  $c$ ,  $e$  – это константы, то длина волны рентгеновского излучения  $\lambda$  зависит только от величины ускоряющего напряжения, приложенного к трубке  $U$ . Т.е., увеличивая напряжение на рентгеновской трубке, мы будем получать тормозное рентгеновское излучение с все более короткой длиной волны. Т.к. скорости ускоренных электронов различ-

ны, то спектр такого тормозного рентгеновского излучения будет непрерывным (Рис.8.2), т.е., в нем будут присутствовать все длины волн, начиная с коротковолновой границы. Использовать такое тормозное рентгеновское излучение в научной и практической деятельности неудобно вследствие того, что в его спектре присутствуют все длины волн, и мы не знаем, на какой конкретно длине волны проводятся наши исследования.

Поэтому, в научной и практической деятельности применяется другой вид – **характеристическое рентгеновское излучение**, механизм возникновения которого следующий.

Мы уже говорили выше, что при резком торможении электрон может передать атому анода свою энергию. При этом атом анода перейдет в возбужденное состояние. Это значит, что «собственные» электроны такого возбужденного атома

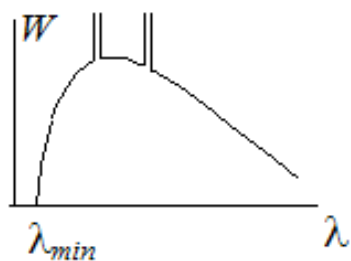


Рис. 8.3

анода перешли на более высокий энергетический уровень (т.е., электроны «перепрыгивают» на более высокие орбиты). При этом на тех местах, где они находились, возникают вакантные места. Такое возбужденное состояние атома нестабильно. Электроны в возбужденном атоме стремятся вернуться в стационарное состояние. И если они переходят с более высоких орбит на первую, то должны сами излучать энергию в виде фотонов рентгеновского излучения.

Но, при этом, разность энергий между энергетическими уровнями в атоме постоянна! И поэтому атомы анода излучают рентгеновские фотоны со строго определенной длиной волны. И тогда на фоне непрерывного спектра тормозного рентгеновского излучения возникают очень мощные узкие «всплески» характеристического рентгеновского излучения самих атомов анода (Рис.8.3). *Рентгеновское излучение, которое излучают атомы анода, называется характеристическим.* Возникает вопрос: «Почему это излучение называется именно характеристическим?». Потому, что атомы анода определенного сорта излучают только свои определенные длины волн рентгеновского излучения. Т.е., такое рентгеновское излучение характеризует именно эти атомы, поэтому и называется характеристическим. Если теперь на пути испускаемого рентгеновской трубкой рентгеновского излучения, состоящего из тормозного и характеристического излучения, поставить фильтр (тонкая пластинка металла, который будет поглощать менее интенсивное тормозное излучение), то из фильтра будет выходить только более мощное характеристическое излучение со строго определенной длиной волны, которое и используется в научной и практической деятельности.

Но, при этом, разность энергий между энергетическими уровнями в атоме постоянна! И поэтому атомы анода излучают рентгеновские фотоны со строго определенной длиной волны. И тогда на фоне непрерывного спектра тормозного рентгеновского излучения возникают очень мощные узкие «всплески» характеристического рентгеновского излучения самих атомов анода (Рис.8.3).

Основное применение рентгеновского излучения в биологии и медицине связано с тем, что за счет малой длины волны оно обладает проникающей способностью. Проходя через любое вещество (Рис.8.4) рентгеновское излучение, как и любая электромагнитная волна, расходует свою энергию на преодоление сопротивления самой среды. Уменьшение интенсивности рентгеновского излучения при его прохождении через вещество подчиняется **закону Бугера**: *интенсивность рентгеновского излучения, проходящего через вещество уменьшается по экспоненциальному закону*:

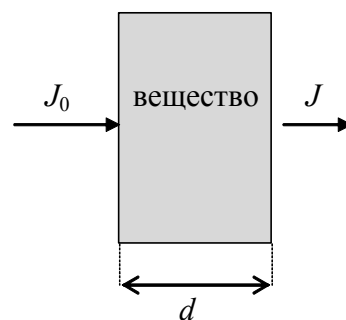


Рис.8.4

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (8.8)$$

где  $J_0$  и  $J$  – интенсивность входящего и выходящего из вещества рентгеновского излучения, соответственно,  $d$  – толщина слоя вещества,  $\mu$  – коэффициент поглощения рентгеновского излучения данным веществом.

В медицинской практике используется два основных диагностических метода. Метод регистрации получаемого изображения на фотопластинке называется **рентгенография**, а результат – полученное изображение называется **рентгенограмма**. Метод регистрации получаемого изображения на экране рентгеновского аппарата – **рентгеноскопия** (Рис.8.5).



Рис.8.5

Сущность процесса получения изображения внутренних органов при прохождении через живые ткани рентгеновского излучения заключается в следующем. Различные ткани живого организма обладают разными коэффициентами поглощения рентгеновского излучения.

Например, коэффициент поглощения мягких тканей меньше, чем коэффициент поглощения твердых тканей (кости):

$\mu_{\text{мягк}} < \mu_{\text{кость}}$ . Это значит, что, проходя через мягкие ткани, рентгеновское излучение будет незначительно терять свою интенсивность. Тогда как, при прохождении через костную ткань, рентгеновское излучение сильно поглощается. Поэтому, рентгеновское излучение, прошедшее мягкие ткани и, попавшее на фотопластинку, вызовет её сильное засвечивание, т.е., почернение. Поэтому мягкие ткани на рентгенограмме выглядят более темными (Рис.8.6). И наоборот. Рентгеновское излучение, прошедшее через костную ткань, сильно поглощено и, попадая на фотопластинку, вызывает её меньшее почернение. В результате мы видим так называемое контрастное (черно-белое) изображение внутренних органов.

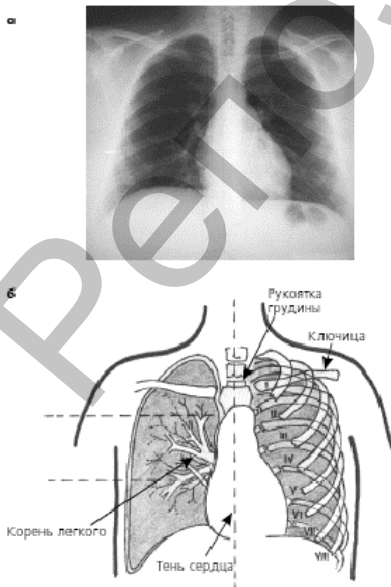


Рис.8.6

## №9. Люминесценция и ее виды

Все тела излучают инфракрасное (тепловое) излучение, которое невидимо глазом. Но существуют явления, когда кроме теплового, тела могут излучать и в видимом диапазоне. **Люминесценция** – это явление излучения телом электромагнитных волн в видимом (световом) диапазоне, избыточное над его тепловым излучением. Вещества способные к люминесценции называются **люминофорами**. Люминесценцию можно условно разделить:

### 1. По длительности люминесценция делится на:

а) **Флуоресценцию**, которая заканчивается сразу после прекращения действия внешнего возбуждения. Например, свечение дорожных знаков, которое продолжается до тех пор, пока на краску - люминофор падает свет фар машины.

б) **Фосфоресценцию**, которая продолжается длительное время после снятия внешнего возбуждения. Например, свечение белого фосфора, различных светомасс (такими светомассами покрывают стрелки часов).

### 2. По способам возбуждения люминесценция делится на:

а) **Катодолюминесценцию**, которая происходит при падении на люминофор пучка ускоренных электронов. Например, такая люминесценция наблюдается на экране электронно-лучевой трубки (кинескоп телевизора, монитора компьютера). Ускоренные электроны, ударяясь об экран трубки, покрытый люминофором, возбуждают его атомы. Возвращаясь в стационарное состояние, атомы люминофора излучают световые фотоны. В результате мы и видим изображение.

б) **Электролюминесценцию**, которая возбуждается под действием электрического поля. Например, такой вид люминесценции используется в работе ламп дневного света. В колбе такой лампы находятся пары ртути. При включении внешнего напряжения эти пары оказываются под действием сильного электрического поля, которое возбуждает атомы газа. Возбужденные атомы, возвращаясь в стационарное состояние, излучают фотоны невидимого глазу УФ - излучения. Такое излучение попадает на внутренние стенки лампы, покрытые люминофором, возбуждает его атомы, которые, возвращаясь в стационарное состояние, излучают световые фотоны. Учитывая, что пары ртути излучают УФ – излучение, которое полностью не поглощается люминофором, то необходимо знать, что такие лампы дневного света, с точки зрения экологии и медицины, не совсем безопасны для нашего зрения.

в) **Хемилюминесценцию**, которая возбуждается под действием экзотермических химических реакций. Существует особый класс химических реакций, при которых энергия реакции излучается не в виде тепла, а в виде световых фотонов. Например, свечение белого фосфора при его окислении на воздухе, процессы гниения, сопровождающиеся окислительно-восстановительными реакциями.

г) **Биолюминесценцию**, которая возбуждается под действием окислительно-восстановительных реакций в живых организмах. Например, способностью к биолюминесценции обладают светлячки, моллюски, глубоководные рыбы и др.

д) **Рентгенолюминесценцию**, которая возбуждается под действием рентгеновского излучения на экране рентгеновского аппарата. Механизм такой люминесценции аналогичен механизму катодолюминесценции. Отличие в том, что атомы люминофора экрана рентгеновского аппарата возбуждаются не ускоренными электронами, а рентгеновскими фотонами.

### 3. По внутриатомным процессам люминесценция делится на:

а) **Спонтанную (самопроизвольную)**, при которой возбужденные атомы и молекулы возвращаются в стационарное состояние хаотично (это все выше перечисленные виды люминесценции).

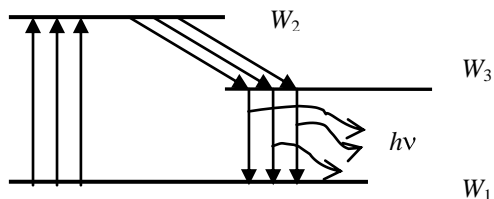


Рис.9.1

б) **Вынужденную (индуцированную)**, при которой все возбужденные атомы возвращаются в стационарное состояние одновременно, излучая световые фотоны. На этом принципе основана работа **оптических квантовых генераторов – лазеров**.

Лазеры работают на принципе 3-х уровневой системы (Рис.9.1). Вначале под действием внешнего возбуждения атомы переходят с энергетического уровня  $W_1$  на более высокий энергетический уровень  $W_2$  (такой механизм называется **накачка лазера**). Затем без излучения атомы переходят на промежуточный - **метастабильный уровень** с энергией  $W_3$ , на котором они «накапливаются». При прохождении по системе управляющего сигнала (такой механизм называется «поджиг» лазера) все атомы переходят на уровень с энергией  $W_1$ . Учитывая, что разность энергий между уровнями  $W_3$  и  $W_1$  одинакова для всех атомов, то согласно правилу частот, все атомы при этом излучают фотоны  $h\nu$  с одинаковой частотой и энергией. Напомним, что **электромагнитное излучение с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз называется когерентным**. Таким образом, **лазер излучает высоко когерентное электромагнитное излучение**. На рис.9.2 приведена принципиальная схема рубинового лазера.

За счет того, что все атомы лазера излучают одновременно, можно добиться большой интенсивности потока энергии лазерного излучения (используется

при сварке, резке металлов). Лазеры с небольшой мощностью широко используются в медицине в качестве лазерного скальпеля. У такого лазерного скальпеля несколько преимуществ. Во-первых, лазерное излучение как бы запаивает кровеносные сосуды, т.е. обладает коагуляционным действием – кровь сворачивается (небольшие потери крови при операции). Во-вторых, лазерный луч – это поток фотонов – такой лазерный скальпель не требует дезинфекции. В-третьих, частота лазерного излучения настолько велика, что она превышает частоту нервного импульса, который формирует болевой эффект и поэтому центральная нервная система не успевает среагировать - меньший болевой эффект.

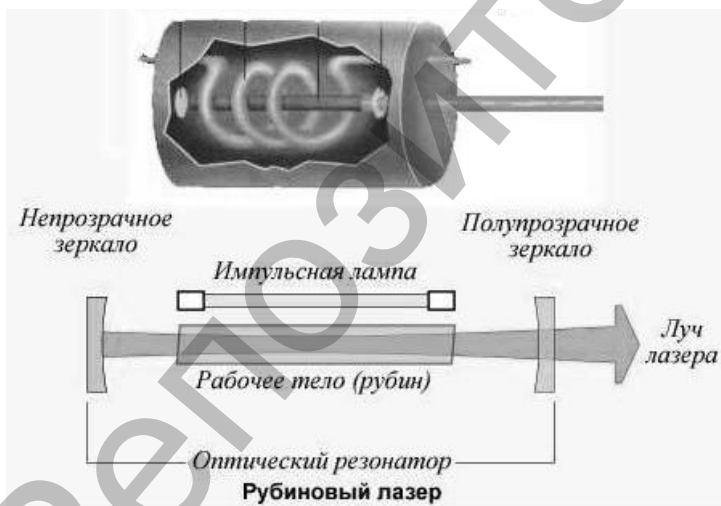


Рис.9.2



## №10. Волновые свойства микрочастиц. Волны де Бройля

В 1923 г. Луи де Бройль выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Он предположил, что сочетание волновых и корпускулярных свойств является общим свойством любых материальных объектов.

Это значит, что любое тело массой  $m$ , движущееся со скоростью  $v$ , может быть охарактеризовано не только корпускулярными параметрами (координатой в пространстве, импульсом, энергией), но и волновыми (частотой и длиной волны). По предложению де Бройля, длина волны для любого материального объекта связана с его импульсом:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (10.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Выражение (10.1) называется **формулой де Бройля**, а длина волны любого материального объекта, рассчитанная с помощью (6.1) – **дебройлевской длиной волны**.

Вскоре гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально. В 1927 г. К. Девиссон и Л. Джермер (США), а в 1928 г. П.С. Тартаковский (Ленинградский университет) и Г. Томсон (Англия) наблюдали дифракцию электронов.

Такое свойство микрочастиц было обнаружено в опыте, в котором через очень тонкую металлическую фольгу пропускали пучок ускоренных электронов (Рис.10.1.а). Такая металлическая фольга для электронов представляет собой дифракционную решетку, в которой роль препятствий играют атомы металла, а роль щелей – межатомные промежутки. В качестве экрана использовалась фотопластинка, результат воздействия на которую электронов можно увидеть в виде ее почернения (где больше попало электронов – там сильнее почернение).

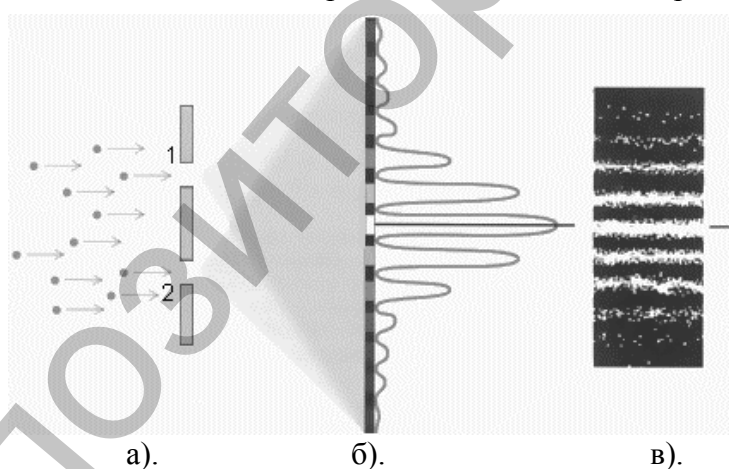


Рис. 10.1

Первоначально исследователи предположили, что электроны, пройдя через фольгу, будут скапливаться «напротив» щелей. В этом случае можно было бы говорить, что электроны – это только частицы. Однако каково же было удивление исследователей, когда, проявив фотопластинку, они увидели (Рис.10.1.в), что в результате на экране возникла дифракционная картина распределения электронов (там, где засветка больше – больше попало электронов). Такая фотография соответствует распределению интенсивности почернения как на рис.10.1.б. Т.е. мы наблюдаем чередование максимумов и минимумов распределения электронов после их прохождения через металлическую фольгу. Но дифракционную картину могут дать только волны. Таким образом, было открыто, что *все микрочастицы представляют собой волны материи, которые называют волнами де-Бройля*.

Впоследствии волновые свойства были обнаружены и у нейтронов, протонов, у атомов и молекул.

Экспериментальное доказательство наличия волновых свойств микро-частиц привело к выводу о том, что сочетание волновых и корпускулярных свойств – это общее свойство материи.

Экспериментально обнаружить волновые свойства макроскопических объектов (например, песчинок, теннисных шаров и др.) не удалось. Это объясняется тем, что для таких объектов дебройлевская длина волны очень мала. Действительно, расчет показывает, что для макроскопических тел, движущихся с небольшими скоростями дебройлевская длина волны составляет величину порядка  $10^{-30}$  м, что на 20 порядков меньше размера атома. Дифракционных решеток с таким периодом просто не существует. Поэтому считается, что макроскопические тела проявляют только одну сторону своих свойств – корпускулярную – и не проявляют волновую.

Наличие волновых свойств у микро-частиц позволило ученым описывать их движение в виде волнового процесса. М. Борн дал вероятностную трактовку волн де Бройля: квадрат амплитуды дебройлевской волны в данной точке пространства является мерой вероятности того, что частица находится в этой точке.

Если разогнать электроны до скоростей близких к скорости света, то получим, что де-Бройлевская длина волны электрона окажется порядка  $\sim 10^{-10}$  м. Но тогда ускоренные электроны можно использовать для изучения структуры вещества, на чем основан принцип работы электронного микроскопа. На рис.10.2 представлена принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа. Электронный пучок, вышедший из электронной пушки 1, концентрируется магнитной линзой 2 на предмете 3. Расходимость электронного пучка ограничивается диафрагмой 4. Электронная пушка вместе с

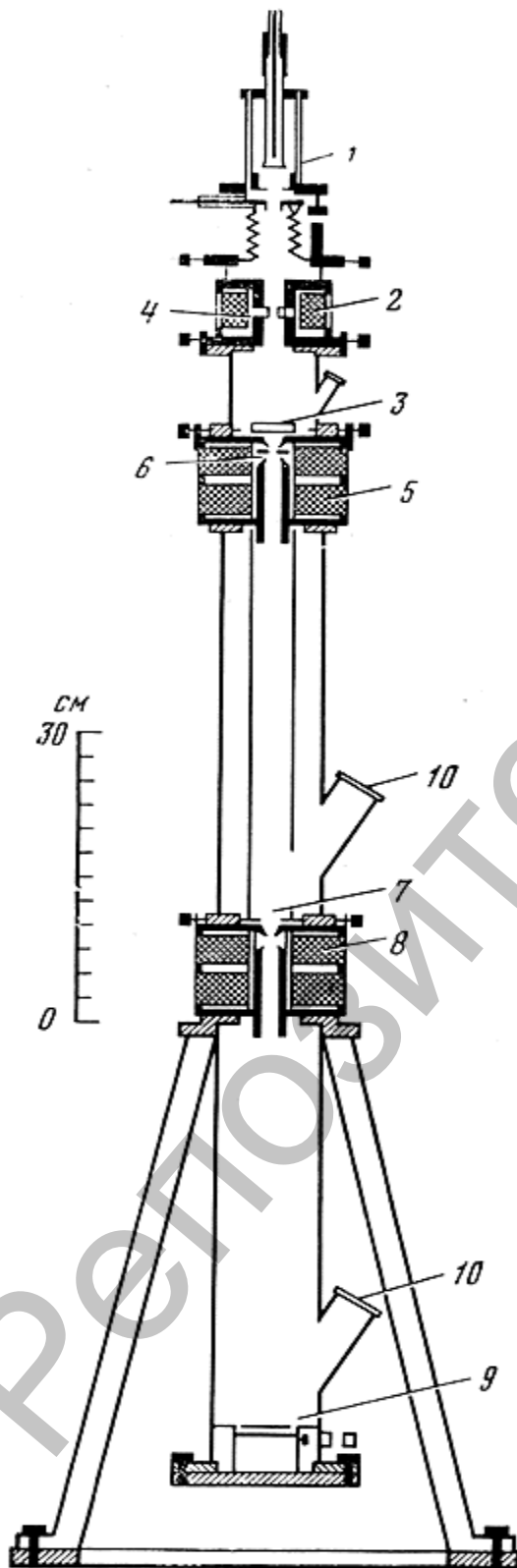


Рис.10.2

конденсорной магнитной линзой и диафрагмой составляет осветительное устройство электронного микроскопа. Объектив электронного микроскопа образует линза 5 с апертурной диафрагмой 6. Для облегчения настройки прибора используется промежуточный экран 7. Изображение, полученное в плоскости промежуточного экрана, в свою очередь, является предметом для магнитной линзы 8, которая проецирует увеличенное изображение на экран 9. Это изображение может наблюдаться через стеклянные окна 10 в корпусе электронного микроскопа.

Электроны, движущиеся с большой скоростью, пронизывают изучаемый предмет и, проходя его, теряют часть своей скорости (где предмет плотнее электроны замедляются больше и наоборот). Затем они попадают на экран, покрытый люминофором, и мы видим на нем контрастное увеличенное изображение предмета. В электронных микроскопах может быть получено изображение, увеличенное в десятки тысяч раз при высокой разрешающей способности, что позволяет изучать тонкие пленки различных материалов, в частности тонкие срезы биологических тканей. Например, изображение вирусов было впервые получено с использованием электронного микроскопа.

## Приложения

### Приложение 1. Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Название приставки	Обозначение	Коэффициент умножения	Пример
Экса	Э	$10^{18}$	Эксаметр (Эм)
Пета	П	$10^{15}$	Петаметр (Пм)
Тера	Т	$10^{12}$	Тераджоуль (ТДж)
Гига	Г	$10^9$	Гигаом (ГОм)
Мега	М	$10^6$	Мегаом (МОм)
Кило	к	$10^3$	километр (км)
Гекто	г	$10^2$	гектоватт (гВт)
Дека	да	$10^1$	декалитр (дал)
Деци	д	$10^{-1}$	дециметр (дм)
Санتي	с	$10^{-2}$	сантиметр (см)
Милли	м	$10^{-3}$	миллиампер (мА)
Микро	мк, μ (греч. "мю")	$10^{-6}$	микровольт (мкВ, μВ)
Нано	н	$10^{-9}$	нанометр (нм)
Пико	п	$10^{-12}$	пикофарада (пФ)
Фемто	ф	$10^{-15}$	фемтометр (фм)
Атто	а	$10^{-18}$	аттокулон (аКл)

**Примечание:** при произношении ударение не должно приходиться на приставку.

#### Пример вычисления выражения, включающего значения физических величин со степенями числа 10

Пусть измерены некоторые физические величины  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ . Значения этих величин, например:  $X_1 = A \cdot 10^{15}$ ,  $X_2 = B \cdot 10^{-38}$  и  $X_3 = C \cdot 10^6$ , где  $A$ ,  $B$  и  $C$  - любые вещественные числа.

Пусть далее вам необходимо вычислить некоторое выражение, в которое входят все данные величины  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , например:  $F = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$ .

Подставив в выражение измеренные значения  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , получим:

$$F = \frac{A \cdot 10^{15} \cdot B \cdot 10^{-38}}{C \cdot 10^6}$$

Т.к. бессмысленно и невозможно ввести в калькулятор, например 38 нулей, то воспользуемся правилами, согласно которым:

1. при перемножении степеней показатели степени складываются;
2. при делении степеней показатели степени вычитаются;
3. при возведении степени в степень показатели степени перемножаются.

$$\text{Тогда } F = \frac{A \cdot 10^{15} \cdot B \cdot 10^{-38}}{C \cdot 10^6} = \frac{A \cdot B}{C} \cdot \frac{10^{15} \cdot 10^{-38}}{10^6} = \frac{A \cdot B}{C} \cdot 10^{-29}.$$

Вычислив при помощи калькулятора выражение  $\frac{A \cdot B}{C}$ , окончательный результат необходимо помножить на  $10^{-29}$ .

## Приложение 2. Основные физические константы в СИ

Название	Символ	Значение
Гравитационная постоянная	$\gamma$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$2,99793 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,022252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31510 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,6487 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Планка	$h$	$6,62491 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,6607 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная Вина	$b$	$2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Заряд электрона	$e$	$1,60021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

## Приложение 3. Связь между различными системами измерения

### Связь между различными системами измерения температуры

Шкала Цельсия	$t_{\text{крист. воды}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кипен. воды}} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$
Шкала Фаренгейта	$t_{\text{крист. воды}} = 32 \text{ } ^\circ\text{F}$	$t_{\text{кипен. воды}} = 212 \text{ } ^\circ\text{F}$
Связь шкалы Цельсия и Фаренгейта	$\frac{t \text{ } ^\circ\text{C}}{100} = \frac{t \text{ } ^\circ\text{F} - 32}{180}$ или $t \text{ } ^\circ\text{F} = 1,8 \cdot t \text{ } ^\circ\text{C} + 32^\circ$	
Шкала Кельвина	$t_{\text{крист. воды}} = 273,15 \text{ } ^\circ\text{K}$	$t_{\text{кипен. воды}} = 373,15 \text{ } ^\circ\text{K}$
Связь шкалы Цельсия и Кельвина	$T \text{ } ^\circ\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$	

### Англо-американские внесистемные единицы измерения

Русское название	Англо-американские единицы	Метрические единицы
<b>Меры длины</b>		
1 миля (сухопутная)	1 760 ярдов	1 609 м
1 миля (морская)	6 080 футов	1 852,2 м
1 ярд	3 фута; 36 дюймов	91,44 см
1 фут	12 дюймов	304,8 мм
1 дюйм	0,0833 фута	25,4 мм
1 кабельтов	-	185,32 м
<b>Меры площади</b>		
1 акр	4 840 кв. ярдов	4 047 кв. м.
1 кв. миля	640 акров	258,99 га

Русское название	Англо-американские единицы	Метрические единицы
<b>Меры жидких тел</b>		
1 баррель	34,97 бр. галлон 42 галлона США	158,988 л
1 галлон США	4 кварта, 8 пинт США; 128 жидк. унций	3,785 л
1 кварта США	2 пинты США	0,94625 л
1 пинта США	16 жидк. унций,	0,47312 л
1 британский галлон	4 бр. кварта, 8 бр. пинт	4,546 л
1 британская кварта	2 бр. пинты	1,1365 л
1 британская пинта	1,2 пинты США	0,5682 л
1 жидкая унция	-	0,028 л
<b>Меры сыпучих тел</b>		
1 кварта США	2 пинты США	1,101 л
1 пинта США	0,97 бр. кварта	0,5506 л
1 британская кварта	2 бр. пинты	1,1365 л
1 британская пинта	1,03 пинты США	0,5682 л
<b>Меры веса</b>		
1 стоун	14 фунтов	6,35 кг
1 фунт коммерческий	16 унций	453,6 г
1 унция коммерческая	16 драхм	28,35 г
1 драхма коммерческая	27,34 грана	1,772 г
1 гран коммерческий	-	64,8 мг
1 фунт тройский и аптекарский	12 унций, 96 драхм, 5760 гран	373,27 г
1 унция тройская и аптекарская	8 драхм, 480 гран	31,106 г
1 драхма аптекарская	60 гран	3,89 г
1 гран аптекарский	-	64,8 мг

## Литература:

1. Белановский, А.С. Основы биофизики в ветеринарии: учебное пособие для студентов по специальности «ветеринарная медицина»/ А.С. Белановский – Москва: Агропромиздат, 1989. – 271 с.: ил.
2. Березовский, В.А. Биофизические характеристики тканей человека: справочное руководство/ В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов – Киев: Наукова думка, 1990. –185 с.: интеграл.
3. Грабовский, Р.И. Курс физики: учебное пособие для высших сельскохозяйственных ВУЗов/ Р.И. Грабовский – изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2004. – 605 с.: ил.
4. Ливенцев, Н.М. Курс физики для медвузов: учебник / Н.М. Ливенцев – изд.5-е, переб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1999. – 648 с.:ил.
5. Ремизов, А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медвузов: учебник / А.Н. Ремизов. – Москва: Высшая школа, 1982. – 607 с.: ил.
6. Пышненко О.В. Механика. Молекулярная физика и термодинамика: рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентами биологического факультета / О.В. Пышненко [и др.]. – Витебск «УО ВГУ им. П.М. Машерова», 2009. – 83 с.
7. Пышненко О.В. Электродинамика. Оптика. Квантово-оптические явления: рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентами биологического факультета / О.В. Пышненко [и др.]. – Витебск «УО ВГУ им. П.М. Машерова», 2009. – 75 с.