

Министерство сельского хозяйства и продовольствия  
Республики Беларусь

Витебская ордена «Знак Почета» государственная  
академия ветеринарной медицины

**Кафедра радиологии и биофизики**

# **ФИЗИКА И БИОФИЗИКА**

Учебно-методическое пособие для студентов учреждений  
высшего образования, обучающихся по специальностям:

1-74 03 02 «Ветеринарная медицина»,  
1-74 03 04 «Ветеринарная санитария и экспертиза»,  
1-74 03 05 «Ветеринарная фармация»

Витебск  
ВГАВМ  
2019

УДК 53:577.3(075.8)

ББК 22.3:28.071я73

Ф50

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области сельского хозяйства в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальностям: 1-74 03 02 «Ветеринарная медицина», 1-74 03 04 «Ветеринарная санитария и экспертиза», 1-74 03 05 «Ветеринарная фармация»

Авторы:

старший преподаватель *И. О. Петроченко*; старший преподаватель *А. Н. Толкач*; старший преподаватель *Н. П. Коваленок*; старший преподаватель *Е. В. Толкач*

Рецензенты:

доктор ветеринарных и биологических наук, профессор *П. А. Красочко*; кандидат физико-математических наук, доцент *Е. Б. Дунина*

**Физика и биофизика** : учеб. – метод. пособие для студентов Ф50 учреждений высшего образования, обучающихся по специальностям : 1-74 03 02 «Ветеринарная медицина», 1-74 03 04 «Ветеринарная санитария и экспертиза», 1-74 03 05 «Ветеринарная фармация» / *И. О. Петроченко* [и др.]. – Витебск : ВГАВМ, 2019. – 208 с.

Учебное пособие написано в соответствии с учебной программой по физике и биофизике для студентов факультета ветеринарной медицины и биотехнологического факультета. Пособие является обобщением многолетнего опыта преподавания дисциплины на кафедре радиологии и биофизики УО ВГАВМ. В краткой и доступной форме содержит весь теоретический материал, необходимый для подготовки к практическим занятиям и к экзамену по физике и биофизике. Пособие предназначено для изучения дисциплин «Физика и биофизика» и «Физика с основами биофизики».

УДК 53+577.3(075.8)

ББК 22.3+28.9 я73

© УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины», 2019

## Содержание

Предисловие .....	4
Введение .....	5
<b>I. Физические основы механики</b>	
Тема №1. Кинематика и динамика поступательного движения материальной точки .....	6
Тема №2. Механика вращательного движения твердого тела. Некоторые вопросы биомеханики .....	18
Тема №3. Механические колебания и волны. Биоакустика .....	30
Тема №4. Гидродинамика. Гемодинамика .....	47
<b>II. Молекулярная физика и термодинамика</b>	
Тема №5. Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества. Реальные газы .....	61
Тема №6. Молекулярные явления в жидкостях .....	74
Тема №7. Физические основы термодинамики Основы термодинамики биологических систем .....	84
<b>III. Электродинамика</b>	
Тема №8. Электростатика. Электрические явления в биологических системах .....	98
Тема №9. Постоянный ток и его действие на биологические системы .....	116
Тема №10. Электромагнетизм .....	129
Тема №11. Переменный ток и его действие на биологические системы .....	143
<b>IV. Оптика</b>	
Тема №12. Геометрическая оптика. Основы фотометрии .....	153
Тема №13. Волновая оптика .....	167
Тема №14. Взаимодействие света с веществом. Квантово-оптические явления .....	176
<b>V. Атомная физика</b>	
Тема №15. Строение атома. Рентгеновское излучение. Люминесценция .....	191
Литература .....	205

## Предисловие

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов факультетов, изучающих курс «Физика и биофизика». Оно написано в соответствии с действующей учебной программой дисциплины «Физика и биофизика» на основе многолетнего опыта преподавания в УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины».

Особенностью данного пособия является его специальная направленность на то, чтобы дать студентам глубокие знания в области тех физических явлений, которые необходимы для изучения профильных дисциплин, таких как: зоогигиена, радиология, физиология сельскохозяйственных животных, генетика с основами биометрии, акушерство с основами гинекологии, механизация и электрификация животноводства и других.

В пособии в краткой форме изложены теоретические вопросы курса «Физика и биофизика» с современных позиций. Сделан акцент на вопросах, которые имеют непосредственное отношение к их будущей профессиональной деятельности. Выделены основные формулы, законы и понятия с целью их дальнейшего применения для решения практических задач. К тексту подобран необходимый иллюстрационный материал, который способствует лучшему усвоению теоретической части дисциплины.

Поскольку данное пособие адресовано студентам первого года обучения, в него включены лишь те вопросы биофизики, которые доступны их пониманию. По этой причине изложение ведется с минимальным количеством математических выкладок. Основное внимание уделяется выявлению сущности физических явлений в биологических системах и ознакомлению с физическими и биофизическими методами, применяемыми в ветеринарии и промышленном животноводстве.

При подготовке врачей ветеринарной медицины и ветеринарных фармацевтов учебной программой предусмотрено 9 лекций (18 учебных часов) и 16 лабораторно-практических занятий (32 учебных часа). А при подготовке ветеринарно-санитарных врачей - 17 лекций (34 учебных часа) и 15 лабораторно-практических занятий (30 учебных часа). Более 80 учебных часов дается студентам на самостоятельную работу. Итогом процесса обучения является экзамен. В связи с этим наше учебно-методическое пособие окажет существенную помощь в изучении и успешной сдаче экзамена по дисциплине «Физика и биофизика».

Кроме этого, пособие написано с целью объяснить тесную связь организма человека и животных с окружающей средой и различными физическими факторами, влияющими на их жизнедеятельность.

Полученные знания при изучении данного пособия могут быть использованы студентами в их практической деятельности для совершенствования методов диагностики, профилактики и лечения домашних и сельскохозяйственных животных, и тем самым способствовать благосостоянию общества и сохранению многообразия природы.

## Введение

Физика получила свое название от греческого слова *φυσικ* - природа. Физические явления происходят в космосе и микромире, в неорганических и органических веществах, в живой и неживой природе.

*Физика – это наука о свойствах и строении материи, о простейших и вместе с тем наиболее общих формах движения материи, об их взаимопревращениях.* Поэтому понятия и законы физики лежат в основе всего естествознания.

Животные и растения представляют собой системы, в которых протекают физические и химические процессы, но жизнь как высшую, биологическую форму движения материи можно понять только на основе комплексного подхода. Поэтому на стыке биологии, химии и физики возникла новая наука – *биофизика, которая изучает физические и биофизические процессы в биологических системах на всех уровнях их организации.*

По изучаемым объектам биофизика близка к биологии, а по применяемым методам – к физике. Традиционно биофизика включает исследование таких вопросов, как влияние на живой организм различных физических факторов, например шума, электромагнитных полей, ионизирующих излучений и др. Некоторые проблемы послужили основой для создания новых областей науки. Так, биологическое действие ионизирующих излучений стало предметом исследования *радиобиологии.*

Большой вклад внесла биофизика в медицину и ветеринарию. Биофизика успешно объясняет многие биологические явления и изучает физические и физико-химические процессы в биологических системах на всех уровнях их организации, а также влияние различных физических факторов (температуры, влажности, вибраций, производственных шумов, искусственного освещения, электромагнитных полей) на живые организмы. Сегодня эта наука тесно связана с электрофизиологией, неврологией, офтальмологией, фармакологией и пр.

Комплексные исследования физиков, биофизиков, биохимиков и физиологов позволили получить представление о строении и свойствах биологических макромолекул, механизмах действия клеточных мембран и клеточных структур.

На вооружение ветеринарных врачей поступает новейшая диагностическая и исследовательская аппаратура, приборы для автоматической регистрации физиологических процессов в организме животных и многое другое. В настоящее время нет области ветеринарии, которая не пользовалась бы физическими приборами и не применяла бы физических и биофизических методов для диагностики и лечения.

Кроме этого, животноводческие и птицеводческие производственные хозяйства оснащены множеством механизмов и аппаратов. Выяснение их влияния на физиологию и продуктивность сельскохозяйственных животных возможно только с помощью ветеринарных специалистов, вооруженных знаниями физики и биофизики.

# I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

**Механика** – раздел физики, в котором изучают механическое движение тел.

Под **механическим движением** понимают изменение взаимного положения тел или частей одного тела в пространстве с течением времени.

Различают три вида механического движения:

- поступательное,
- вращательное,
- колебательное.

Механика делится на кинематику и динамику.

## Тема №1. Кинематика и динамика поступательного движения материальной точки

### 1.1. Кинематика поступательного движения материальной точки.

#### Основные характеристики и виды движения

**Кинематика** – раздел механики, в котором изучают движение тел без учета причин, вызвавших это движение.

**Основной задачей кинематики** является определение положения тела в любой момент времени.

При **поступательном движении** твердого тела все его точки описывают одинаковые линии и имеют одинаковую скорость.

Если форма и размеры тела не оказывают влияния на характер движения, то такое тело принимают за материальную точку.

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

В окружающем нас мире нет абсолютно неподвижных тел. Все тела движутся относительно друг друга, следовательно, **механическое движение является относительным**. В связи с этим при изучении движения материальной точки необходимо выбрать систему отсчета.

**Система отсчета** – это система координат, связанная с телом отсчета, относительно которого рассматривается движение материальной точки и прибор для измерения времени.

#### Характеристики поступательного движения:

1. **Траектория** – линия, описываемая движущейся материальной точкой в пространстве.

Движение называется **прямолинейным**, если траектория – прямая линия, и **криволинейным**, если траектория – кривая линия.

2. **Путь  $S$**  – длина траектории.

3. **Перемещение  $\vec{S}$**  – вектор, соединяющий начальное и конечное положение материальной точки.

При прямолинейном движении путь и перемещение по величине совпадают.

В СИ перемещение и путь измеряются в **метрах**:

$$[\vec{S}] = [S] = \text{м}$$

4. **Скорость**  $\vec{v}$  – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения перемещения.

Направлена скорость всегда по касательной к траектории в данной точке (рисунок 1.1).

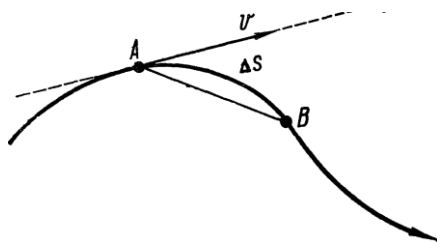


Рисунок 1.1

Различают следующие виды:

1) **средняя скорость**  $v_{cp.}$  - это скалярная физическая величина, численно равная отношению пути к промежутку времени, за который этот путь пройден:

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

2) **мгновенная скорость**  $\vec{v}_{мгн.}$  в любой точке траектории - это вектор, по модулю равный пределу средней скорости при стремлении промежутка времени к нулю:

$$v_{мгн.} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} v_{cp.} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Единица измерения скорости в СИ – **метр в секунду**:

$$[v] = \text{м/с}$$

5. **Ускорение**  $a$  – это векторная физическая величина, численно равная изменению скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло.

Направлено ускорение в ту же сторону, что и вектор изменения скорости.

Различают:

1) **среднее ускорение**  $a_{cp.}$  - это скалярная физическая величина, численно равная изменению скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$a_{cp.} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t} \quad (1.3)$$

2) **мгновенное ускорение**  $\vec{a}_{\text{мгн.}}$  в любой точке траектории – это вектор, по модулю равный пределу среднего ускорения при стремлении промежутка времени к нулю:

$$a_{\text{мгн.}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} a_{\text{ср.}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.4)$$

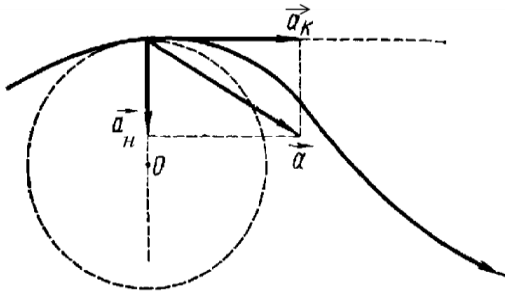


Рисунок 1.2

При криволинейном движении вектор ускорения раскладывается на две составляющие, одна из которых направлена по касательной к траектории и называется **касательным**, или **тангенциальным ускорением**  $\vec{a}_k$ , а другая – по нормали – к центру окружности и называется **нормальным**, или **центростремительным ускорением**  $\vec{a}_n$  (рисунок 1.2).

**Касательным** называется ускорение, характеризующее изменение скорости по величине за единицу времени:

$$a_k = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_1 - v_2}{\Delta t} \quad (1.5)$$

**Нормальным** называется ускорение, характеризующее изменение скорости по направлению за единицу времени:

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.6)$$

где R – радиус окружности.

Если скорость тела изменяется и по величине, и по направлению, то мгновенное ускорение будет определяться по формуле:

$$\vec{a}_{\text{мгн.}} = \vec{a}_k + \vec{a}_n \quad (1.7)$$

А его величина определяется по теореме Пифагора:

$$a_{\text{мгн.}} = \sqrt{a_k^2 + a_n^2} \quad (1.8)$$

В зависимости от величины ускорения различают четыре вида движения:



1) если  $a_k=0$  и  $a_n=0$ , значит  $a=0$  и  $v=const$  - движение **равномерное прямолинейное**;

2) если  $a_k=const$ , а  $a_n=0$ , значит  $a=a_k$  - движение **равнопеременное прямолинейное**.

Скорость и путь при равнопеременном прямолинейном движении:

$$\begin{aligned}v &= v_0 \pm a \cdot t ; \\S &= v_0 \cdot t \pm \frac{a \cdot t^2}{2} ,\end{aligned}\tag{1.9}$$

где «плюс» - для равноускоренного,

«минус» - для равнозамедленного движения;

3) если  $a_k=0$ , а  $a_n=const$ , значит  $a=a_n$  - движение **равномерное по окружности**;

4) если  $a_k=const$  и  $a_n=const$ , значит  $a=const$  - движение **равнопеременное криволинейное**.

## 1.2. Динамика поступательного движения материальной точки. Законы Ньютона в инерциальных системах отсчета

*Динамика* – раздел механики, в котором изучают движение тел в связи с их взаимодействием с другими телами.

Все тела находятся в постоянном движении. Встречаясь, они взаимодействуют друг с другом. Движение и взаимодействие – два неотъемлемых свойства материи.

Для характеристики взаимодействия вводят понятие силы.

**Сила**  $\vec{F}$  – векторная величина, являющаяся мерой действия одного тела на другое.

Сила задана, если известны точка ее приложения, направление и модуль.

Единица измерения силы в СИ - **ньютон**:

$$[F] = \text{Н}$$

Если одинаковой силой подействовать на разные тела, то они отреагируют по-разному. Такая способность называется **инертностью тела**.

Для характеристики инертности вводят понятие массы.

**Масса**  $m$  – скалярная величина, являющаяся мерой инертности тела.

В СИ единицей измерения массы является **килограмм**:

$$[m] = \text{кг}$$

В основе динамики лежит три закона движения, сформулированные Ньютоном.

**Первый закон Ньютона:** существуют такие системы отсчета (инерциальные), относительно которых поступательно движущееся тело находится в состоянии покоя или сохраняет свою скорость постоянной, если равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна нулю:

$$\vec{v} = 0 \quad \text{или} \quad \vec{v} = const, \quad \text{если} \quad \vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \quad (1.10)$$

**Второй закон Ньютона:** ускорение, которое приобретает тело прямо пропорционально сумме всех сил, действующих на тело, или равнодействующей всех сил, и обратно пропорционально его массе:

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m} = \frac{\vec{F}}{m}$$

И как следствие:

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

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

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

Выведем закон изменения импульса тела. Для этого в формулу (1.11) подставим формулу (1.3):

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}, \quad \vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{F} = \frac{m \cdot \Delta \vec{v}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{F} \cdot \Delta t = \Delta(m\vec{v})$$

**Закон изменения импульса тела:** изменение импульса тела численно равно импульсу силы, действующей за тот же промежуток времени:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta(m\vec{v}), \quad (1.13)$$

где  $\vec{F} \cdot \Delta t$  - импульс силы;

$m\vec{v}$  - импульс тела;

$\Delta(m\vec{v})$  - изменение импульса тела.

В изолированных системах выполняется закон сохранения импульса тела.

**Системой** называют совокупность тел, ограниченных замкнутой поверхностью (которая может быть воображаемой).

Силы, с которыми взаимодействуют между собой тела системы, называются **внутренними**, а силы, создаваемые телами, не принадлежащими к данной системе, - **внешними**.

**Изолированной** называется система, в которой тела взаимодействуют только друг с другом и на которую не действуют внешние силы.

**Закон сохранения импульса:** геометрическая сумма импульсов тел, составляющих изолированную систему, остается постоянной при любых движениях и взаимодействиях тел этой системы между собой:

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 + \dots + m_n \cdot \vec{v}_n = const \quad (1.14)$$

На законе сохранения импульса основан метод исследования механических проявлений сердечной деятельности, называемый **баллистокардиографией**.

**1.3. Закон всемирного тяготения, гравитационное поле, сила тяжести, вес тела. Невесомость, перегрузки и их влияние на организм**

Все тела притягиваются друг к другу, т.е. между ними действуют **силы взаимного притяжения**, которые еще называют **гравитационными силами**, или **силами тяготения**.

Силу взаимного притяжения определяют **законом всемирного тяготения**, открытого Ньютоном в 1667 году.

**Закон всемирного тяготения:** два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (1.15)$$

где  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$  - гравитационная постоянная.

Взаимное притяжение тел осуществляется через особый вид материи – их **гравитационные поля**.

**Закон всемирного тяготения вблизи поверхности Земли:**

$$F_T = m \cdot g, \quad (1.16)$$

где  $m$  – масса тела;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

**Сила тяжести**  $F_T$  – это сила притяжения тел к Земле.

Приложена она к центру массы тела и направлена к центру Земли.

Если сила тяжести действует на тело, то само тело действует на опору или подвес.

**Вес тела  $P$**  – это сила, с которой тело, вследствие притяжения к Земле, действует на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес:

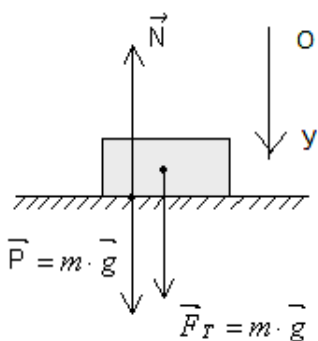
$$P = m \cdot g \quad (1.17)$$

Вес тела приложен к опоре.

Вес тела зависит от величины и направления ускорения, с которым движется тело.

Рассмотрим три случая:

**1. Тело на опоре находится неподвижно или движется относительно Земли равномерно и прямолинейно (рисунок 1.3)**



На тело действуют две силы: сила реакции опоры  $\vec{N}$  и сила тяжести  $\vec{F}_T$ . Если тело неподвижно или движется равномерно, то ускорение тела  $\vec{a}=0$  и второй закон Ньютона в векторном виде примет вид:

$$\vec{N} + m \cdot \vec{g} = 0,$$

где  $\vec{N}$  – сила реакции опоры;  
 $m \cdot \vec{g}$  – сила тяжести.

Рисунок 1.3

Выберем ось отсчета  $OY$  и найдем проекции сил на выбранную ось:  
 $-N + m \cdot g = 0$

Отсюда сила реакции опоры:  $N = m \cdot g$

По третьему закону Ньютона сила реакции опоры численно равна весу тела:  $N = P$ . Следовательно, вес тела будет равен силе тяжести:

$$P = m \cdot g \quad \dots\dots\dots (1.18)$$

**2. Тело движется вниз с ускорением  $\vec{a}$  (рисунок 1.4)**

Запишем второй закон Ньютона в векторном виде:

$$\vec{N} + m \cdot \vec{g} = m \cdot \vec{a}$$

Выберем ось отсчета  $OY$  и найдем проекции всех сил на выбранную ось:

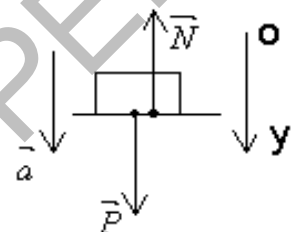


Рисунок 1.4

$$-N + m \cdot g = m \cdot a$$

Тогда сила реакции опоры:  $N = m \cdot g - m \cdot a$

По третьему закону Ньютона сила реакции опоры численно равна весу тела:  $N=P$ . Следовательно, вес тела будет равен:

$$P = mg - ma \quad (1.19)$$

Таким образом, *если тело движется вниз с ускорением  $\vec{a}$ , то вес тела будет меньше силы тяжести.*

*Если тело на опоре движется вниз с ускорением  $a = g$ , то вес тела будет равен нулю:  $P=0$ . Это состояние называется **невесомостью**.*

У людей и животных, находящихся длительное время в состоянии невесомости, наблюдается нарушение процессов обмена веществ, особенно водно-солевого обмена, что сопровождается относительным обезвоживанием тканей, снижением объема циркулирующей крови, уменьшением содержания в тканях ряда элементов, в частности, калия и кальция. Нарушается деятельность вестибулярного аппарата, прекращается деформация внутренних органов, исчезает постоянное напряжение ряда скелетных мышц, ослабляется иммунитет, возможны предобморочные и обморочные состояния после перехода из горизонтального положения в вертикальное.

Нарушения работы организма человека и животных, вызванные невесомостью, обратимы. Ускоренное восстановление нормальных функций может быть достигнуто с помощью физиотерапии и лечебной физкультуры, а также применением лекарственных препаратов. Неблагоприятное влияние невесомости на организм в полете можно предупредить или ограничить с помощью различных средств и методов (мышечная тренировка, электростимуляция мышц, отрицательное давление, приложенное к нижней половине тела, фармакологические и другие средства).

### 3. Тело движется вверх с ускорением $\vec{a}$ (рисунок 1.5)

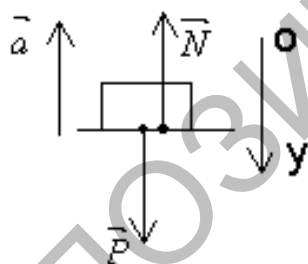


Рисунок 1.5

Запишем второй закон Ньютона в векторном виде:

$$\vec{N} + \vec{m} \cdot g = \vec{m} \cdot a$$

В проекциях на ось ОУ:

$$-m \cdot a = m \cdot g - N \Rightarrow N = m \cdot g + m \cdot a$$

По третьему закону Ньютона сила реакции опоры численно равна весу тела:  $N=P$ . Тогда вес тела будет равен:

$$P = mg + ma \quad (1.20)$$

Таким образом, *если тело на опоре движется вверх с ускорением  $\vec{a}$ , то вес тела будет больше силы тяжести. Это состояние называется **перегрузкой**.*

Перегрузки возникают во время разгона или торможения в скоростном транспорте, при выводе на орбиту космических кораблей или возвращении их на Землю и др.

Перегрузки, связанные с ускорением, вызывают значительное ухудшение функционального состояния организма человека и животных: замедляется ток крови в системе кровообращения, снижаются острота зрения и мышечная активность. Также наблюдается деформация костной ткани и обильное потовыделение, которое может привести к обезвоживанию организма.

Особенно негативно перегрузки влияют на сердечно-сосудистую систему. Происходит резкое перераспределение крови в организме – отток крови к конечностям в положении стоя. В результате может произойти кровоизлияние в сосудах и разрывы внутренних органов.

Тренированный организм может выдержать ускорение:  $a = (4 \div 5)g$  - стоя и  $a = (14 \div 15)g$  - лежа на спине.

#### 1.4. Работа постоянной силы. Мощность. Энергия (полная, кинетическая и потенциальная). Закон сохранения и превращения энергии

Действие постоянной силы  $\vec{F} = const$ , вызывающее перемещение тела, характеризуется работой.

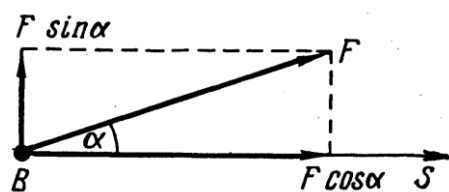


Рисунок 1.6

**Работа  $A$**  – скалярная физическая величина, численно равная скалярному произведению силы  $\vec{F}$  на перемещение  $\vec{S}$  (рисунок 1.6):

$$A = \vec{F} \cdot \vec{S} = F \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (1.21)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением векторами  $\vec{F}$  и  $\vec{S}$ .

При  $0 < \alpha < 90^\circ$  работа положительна, и сила вызывает перемещение тела.

При  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  работа отрицательна, и сила препятствует движению тела.

При  $\alpha = 90^\circ$  сила не совершает работы по перемещению тела.

Если направление силы и перемещения совпадают ( $\alpha = 0$ ), то

$$A = F \cdot S \quad (1.22)$$

Единицей измерения работы является **джоуль** – работа, которую совершает сила в 1Н на пути в 1м:

$$[A] = H \cdot m = Дж$$

Для характеристики быстроты совершения работы используется мощность.

**Мощность** – это работа, совершаемая за единицу времени:

$$N_{cp.} = \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad (1.23)$$

Единицей измерения мощности является **ватт** – мощность, при которой за 1с совершается работа в 1Дж:

$$[N] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}$$

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

Энергия также измеряется в **джоулях** (Дж).

Тела могут совершать работу двумя способами:

**1. Путем непосредственного воздействия (удар).** При этом тело, совершающее работу, до момента воздействия движется ко второму телу.

*Движущееся тело обладает **кинетической энергией**:*

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1.24)$$

**Кинетическая** - энергия движения, зависящая от скорости.

**2. Путем 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**.

**Потенциальная** – энергия, зависящая от положения тела.

Тело, находящееся над поверхностью Земли на некоторой высоте  $h$ , обладает за счет гравитационного поля Земли потенциальной энергией. Такая потенциальная энергия называется **потенциальной энергией в поле силы тяжести**:

$$E_n = m \cdot g \cdot h \quad (1.25)$$

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**:

$$E_{\kappa} = \frac{k \cdot \Delta x^2}{2}, \quad (1.26)$$

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

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:

$$E = E_{\kappa} + E_n \quad (1.27)$$

Если тело совершает работу, то она равна разности полной энергии в начальном и конечном состояниях:

$$A = E_0 - E \quad (1.28)$$

В изолированной системе справедлив **закон сохранения и превращения энергии**: полная механическая энергия в изолированной системе ниоткуда не возникает и никуда не исчезает, она может только превращаться из одного вида в другой или быть израсходованной на совершение работы:

$$E_{\kappa} + E_n = const \quad (1.29)$$

Выполняется закон только при отсутствии сил трения в системе. Наличие сил трения вызывает **диссипацию энергии** – уменьшение механической энергии и превращение ее во внутреннюю энергию, то есть в тепло.

Закон сохранения и превращения энергии является **всеобщим законом природы**, не имеющим исключений. Вновь открываемые процессы и явления лишь подтверждают его.

Этот закон также раскрывает физический смысл понятий энергии и работы. **Энергия есть количественная и качественная характеристика движения материи, а работа – количественная характеристика превращения одних форм движения материи в другие.** Поэтому они выражаются в одинаковых единицах измерения.

Человек и животные совершают механическую работу с помощью мышц.

Мышцы составляют активную часть опорно-двигательного аппарата. Под действием нервных импульсов они сокращаются, развивая определенные усилия. При этом совершается работа по перемещению каких-либо тел. Такое сокращение мышцы называется **изотоническим**, т.е. при постоянной силе. Имеется и другой вид сокращения, при котором мышца разви-



вает усилие, не изменяя свою длину. Такое сокращение мышц называется **изометрическим**. При этом работу по перемещению тел мышца не совершает. Такое сокращение дает возможность удерживать предметы и орудия труда.

При сокращении мышцы будет выполняться *механическая работа*:

$$A_1 = F_m \cdot x, \quad (1.30)$$

где  $x$  – величина укорочения мышцы;  
 $F_m$  – вес нагрузки.

При этом будет выделяться теплота, равная работе  $A_2$ , затрачиваемой на укорочение самой мышцы.

**Общая работа сокращения:**

$$A = A_1 + A_2 \quad (1.31)$$

**Общее изменение энергии в процессе сокращения мышцы:**

$$\Delta E = Q_a + Q_c + A, \quad (1.32)$$

где  $Q_a$  – теплота активации (порядка  $4,2 \cdot 10^{-3}$  Дж на  $10^{-3}$  кг массы мышцы);  
 $Q_c$  – теплота сокращения (при изотоническом сокращении эта теплота выделяется быстрее, чем при изометрическом);  
 $A$  – работа, произведенная мышцей при сокращении.

Согласно выражению (1.32), обнаруживается единство механической и тепловой энергии.

Особенностью мышцы является ее утомляемость при продолжительной нагрузке.

Исследование работоспособности мышц называется **эргометрией**. А для измерения работы и мощности человека и животных применяют приборы - **эргометры**.

## Тема №2. Механика вращательного движения твердого тела. Некоторые вопросы биомеханики

### 2.1. Кинематика вращательного движения абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси

*Абсолютно твердым телом* называется тело, деформацией которого в процессе его движения можно пренебречь.

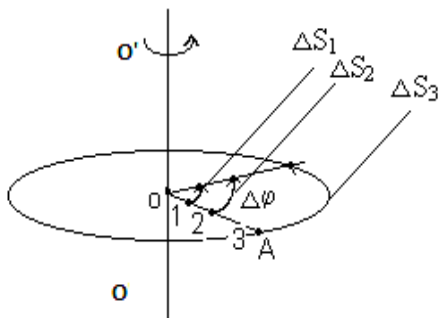


Рисунок 2.1

**Вращательным движением абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси** называется движение, при котором все точки тела описывают окружности, лежащие в параллельных плоскостях, центры которых находятся на одной прямой, называемой осью вращения.

Рассмотрим вращение твердого тела вокруг неподвижной оси  $OO'$  (рисунок 2.1). В процессе этого вращения видно, что каждая точка тела, находящаяся на радиусе  $R$ , за время  $\Delta t$  поворачивается на одинаковый угол  $\Delta\varphi$ , поэтому для описания вращательного движения вводят угловые характеристики.

**Основные характеристики кинематики вращательного движения:**

1. **Угол поворота  $\Delta\varphi$**  – это угол, на который поворачиваются все точки тела, лежащие на радиусе  $R$ , за время  $\Delta t$ .

Единицей измерения в СИ является **радиан**:

$$[\Delta\varphi] = \text{рад} \\ 1 \text{ рад} \approx 57^\circ$$

2. **Угловая скорость  $\vec{\omega}$**  – векторная физическая величина, численно равная отношению изменения угла поворота к промежутку времени, за который он произошел:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Для неравномерного движения используется **мгновенная угловая скорость**:

$$\omega_{\text{мгн.}} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Единица измерения в СИ угловой скорости – **радиан в секунду**:

$$[\omega] = \text{рад/с}$$

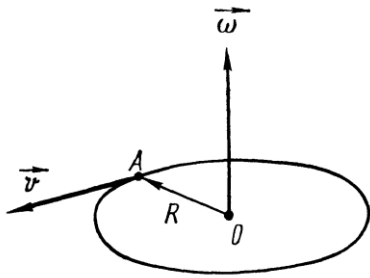


Рисунок 2.2

Угловая скорость всех точек вращающегося тела одинакова, а направление ее определяется по «**правилу буравчика**» (рисунок 2.2): вектор угловой скорости направлен из центра окружности  $O$  с радиусом  $R$  по оси вращения в сторону поступательного движения острия буравчика, рукоятка которого вращается в направлении линейной скорости  $\vec{v}$ .

3. **Угловое ускорение**  $\vec{\beta}$  – векторная физическая величина, численно равная отношению изменения угловой скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \quad (2.3)$$

**Мгновенное угловое ускорение** определяется по формуле:

$$\beta_{\text{мгн.}} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Единица измерения углового ускорения в СИ – **радиан на секунду в квадрате**:

$$[\beta] = \text{рад/с}^2$$

Направление вектора углового ускорения совпадает с направлением вектора изменения угловой скорости.

4. **Частота вращения**  $\nu$  – это число оборотов тела за единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t}, \quad (2.5)$$

где  $N$  - полное число оборотов;  
 $\Delta t$  - время оборотов.

В СИ измеряется в **герцах**:

$$[\nu] = \text{Гц}$$

5. **Период вращения**  $T$  – время одного полного оборота:

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (2.6)$$

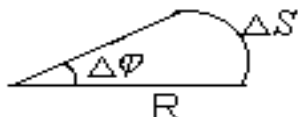
В СИ измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с}$$

При равномерном вращении  $\Delta\varphi = 2\pi$  – угол, соответствующий одному полному обороту тела, а  $\Delta t = T$ , значит угловая скорость связана с периодом и частотой вращения:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu \quad (2.7)$$

Выведем связь между линейными (поступательными) и угловыми (вращательными) характеристиками движения абсолютно твердого тела.



Длина дуги  $\Delta S$ , описываемая любой точкой абсолютно твердого тела (рисунок 2.3) при повороте на угол  $\Delta\varphi$ , определяется по формуле:

$$\Delta S = R \Delta\varphi,$$

Рисунок 2.3

где  $R$  – радиус.

Тогда линейная скорость:  $v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = R \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R \cdot \omega$

Линейное ускорение:  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = R \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = R \cdot \beta$

Таким образом, **формулы связи между угловыми и линейными характеристиками вращательного движения:**

$$v = \omega \cdot R, \quad a = \beta \cdot R \quad (2.8)$$

## 2.2. Момент силы. Момент инерции. Основное уравнение динамики вращательного движения. Момент импульса тела. Закон изменения и сохранения моментов импульсов тел и примеры его применения

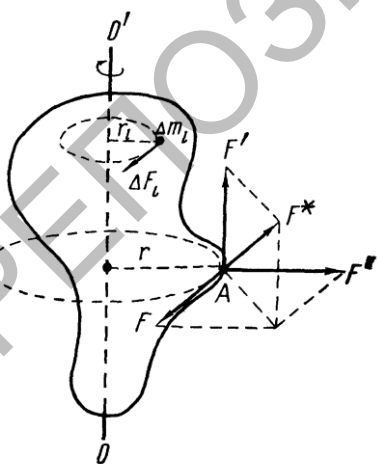


Рисунок 2.4

Пусть абсолютно твердое тело произвольной формы вращается под действием силы  $F^*$ , вокруг оси вращения  $OO'$ . Разложим ее на взаимно перпендикулярные составляющие:  $F'$  (параллельную оси),  $F''$  (перпендикулярную оси и лежащую на линии, проходящей через ось) и  $F$  (перпендикулярную  $F'$  и  $F''$ ). Вращение тела вызывает только составляющая  $F$ , которая направлена по касательной к окружности, описываемой точкой приложения силы, т.е.  $F$  – **вращающая сила** (рисунок 2.4).

Действие вращающей силы зависит не только от ее значения, но и от расстояния точки ее приложения до оси вращения, т.е. от радиуса окружности.

### Характеристики динамики вращательного движения:

**1. Момент силы  $\vec{M}$**  (вращающий момент) - это векторная физическая величина, численно равная векторному произведению вращающей силы  $F$  на радиус окружности  $R$ , описываемой точкой приложения силы:

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{R} \quad (2.9)$$

В скалярной форме:

$$M = F \cdot R \sin \alpha, \quad (2.10)$$

где  $\alpha$  – угол между  $F$  и  $R$ .

Так как  $\alpha = 90^\circ$ , то  $M = F \cdot R$  (2.11)

Единица измерения момента силы – **ньютон на метр**:

$$[M] = \text{Н} \cdot \text{м}$$

Момент силы направлен вдоль оси вращения по правилу буравчика.

Мерой инертности при вращательном движении служит момент инерции тела относительно оси вращения.

**2. Момент инерции материальной точки  $I_0$**  – скалярная физическая величина, равная произведению массы материальной точки  $m_0$  на квадрат расстояния ее до оси вращения  $R_0$ :

$$I_0 = m_0 \cdot R_0^2 \quad (2.12)$$

Единица измерения момента инерции в СИ является **килограмм на квадратный метр**:

$$[I] = \text{кг} / \text{м}^2$$

В связи с тем, что любое тело состоит из множества материальных точек, **моментом инерции тела** называют сумму моментов инерции материальных точек, составляющих тело:

$$I = \sum_{i=1}^n \Delta m_i \cdot R_i^2 = m \cdot R^2 \quad (2.13)$$

Момент инерции тела зависит от того, относительно какой оси оно вращается, от формы и размеров тела, а также от того, как распределена масса тела по объему.

Для тел правильной геометрической формы момент инерции рассчитывается теоретически, а для тел неправильной – экспериментально.

## Формулы моментов инерции некоторых тел (рисунок 2.5):

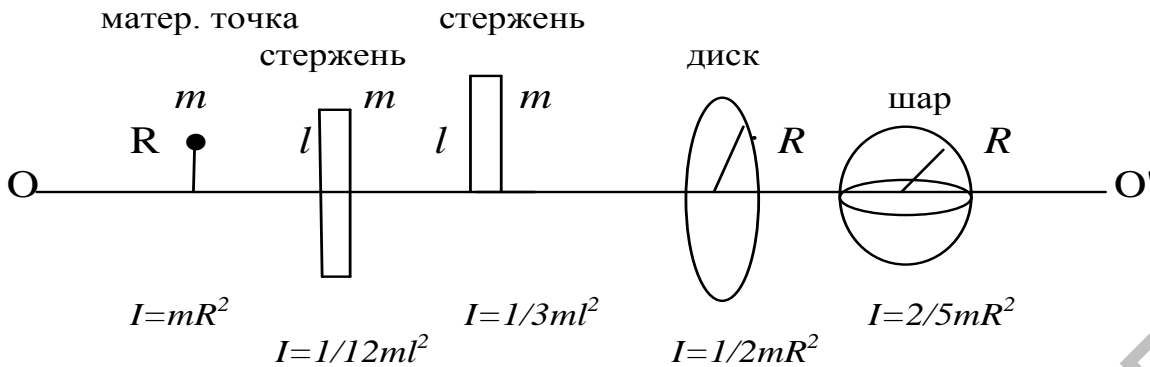


Рисунок 2.5

Выведем основное уравнение динамики вращательного движения.

Для этого запишем второй закон Ньютона:  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

Умножим левую и правую часть на  $R$ :  $\vec{F} \cdot R = m \cdot \vec{a} \cdot R$

Учтем формулу связи линейного и углового ускорения (2.8) и формулу момента силы (2.11) и получим:

$$\vec{M} = m \cdot R^2 \cdot \vec{\beta}$$

По определению (2.13)  $m \cdot R^2 = I$ , то получим:

$$\vec{M} = I \cdot \vec{\beta} \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) является **основным законом динамики вращательного движения**: момент силы, действующий на тело, равен произведению момента инерции этого тела на его угловое ускорение.

Подставив в формулу (2.14) определение углового ускорения (2.3), получим:

$$\vec{M} = I \cdot \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{M} \cdot \Delta t = \Delta(I \cdot \vec{\omega}), \quad (2.15)$$

где  $\vec{M} \cdot \Delta t$  - импульс момента силы;

$\Delta(I \cdot \vec{\omega})$  - изменение момента импульса тела.

Выражение (2.15) представляет собой **закон изменения момента импульса тела**: изменение момента импульса тела за некоторый промежуток времени равно импульсу момента силы за этот же промежуток времени.

Если рассмотреть изолированную систему, состоящую из  $n$  тел, то суммарный момент всех внешних сил, действующих на систему, равен нулю, т.е.  $M=0$ , тогда векторная сумма моментов импульсов тел системы будет величиной постоянной:

$$I_1 \cdot \vec{\omega}_1 + I_2 \cdot \vec{\omega}_2 + \dots + I_n \cdot \vec{\omega}_n = const \quad (2.16)$$

Выражение (2.16) представляет собой **закон сохранения момента импульса тела**: в изолированной системе векторная сумма всех моментов импульсов тел, входящих в систему, есть величина постоянная.

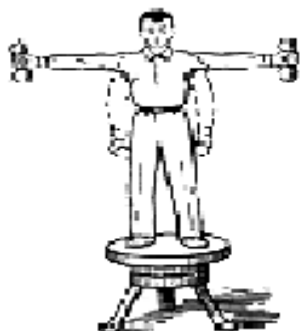


Рисунок 2.6

Закон сохранения момента импульса используют при вращательных движениях относительно свободной оси в спорте: акробатике, гимнастике, фигурном катании на льду, легкой атлетике, фристайле и т.д. Изменяя в процессе вращения позу и, соответственно, момент инерции относительно оси вращения, можно регулировать скорость вращения. Опыт демонстрируется на скамье Жуковского (площадка, легко вращающаяся вокруг вертикальной оси): если, вращаясь с определенной скоростью, человек поднимет руки в стороны, то скорость его уменьшится, а если опустит, то увеличится (рисунок 2.6).

### 1.3. Механика центрифугирования жидкостей. Применение центрифуг в промышленной и лабораторной практике

В лабораторной практике медицины и ветеринарии, в технологиях сельского хозяйства необходимо производить разделение различных коллоидных растворов: кровь, молоко и др. на составляющие этот раствор фракции, например, эритроциты - от плазмы крови, жировые шарики - от жира в молоке.

Процесс отделения частиц вещества от жидкости, в которой они находятся, называется **сепарацией**.

Этот процесс может происходить самопроизвольно.

На частицу, помещенную в жидкость (рисунок 2.7), действуют две силы:

$$1 - \text{сила тяжести: } F_T = m_c \cdot g = \rho_c \cdot g \cdot V,$$

где  $\rho_c$  - плотность частицы;

$V$  - объем тела;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

$$2 - \text{сила Архимеда: } F_A = \rho_{ж} \cdot g \cdot V,$$

где  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости.

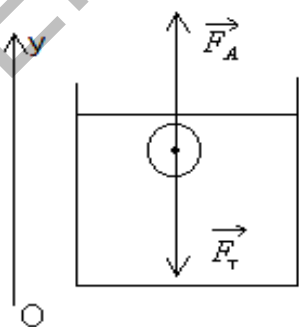


Рисунок 2.7

Найдем равнодействующую этих сил:

$$\vec{F}_p = \vec{F}_T + \vec{F}_A$$

Спроецируем силы на ось ОУ и подставим их выражения:

$$F_p = F_A - F_T = \rho_{ж} \cdot g \cdot V - \rho_ч \cdot g \cdot V = g \cdot V \cdot (\rho_{ж} - \rho_ч) R \quad (2.17)$$

В результате возможны следующие случаи:

- 1) если  $\rho_{ж} > \rho_ч \Rightarrow F_p > 0$ , то частица всплывает;
- 2) если  $\rho_{ж} < \rho_ч \Rightarrow F_p < 0$ , то частица тонет.

Если плотность частицы незначительно отличается от плотности жидкости, то процесс отделения протекает медленно, что не пригодно при медико-биологических исследованиях. Для ускорения процесса разделения пользуются центрифугами.

**Центрифугированием** называется процесс отделения мелких частиц от жидкостей, в которых они находятся, обусловленный центробежной силой инерции.

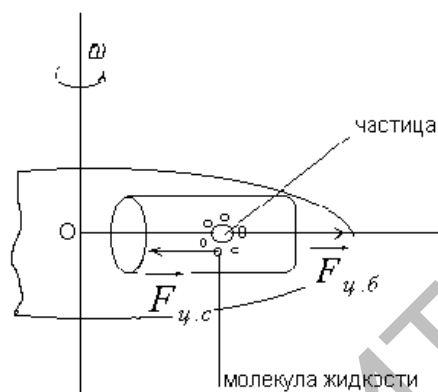


Рисунок 2.8

На диске центрифуги (рисунок 2.8) закрепляется пробирка, например, с кровью. Диск центрифуги приводится во вращение с угловой скоростью  $\omega$ .

При равномерном вращении на частицу действуют две силы:

**1 – центробежная сила** со стороны жидкости, направленная к оси вращения и равная:  $F_{ц.с} = m_{жс} \cdot a_{цс}$

А так как центробежное ускорение определяется по формуле  $a_{цс} = \omega^2 \cdot R$ , то центробежная сила будет определяться:

$$F_{цс} = m_{жс} \cdot \omega^2 \cdot R = \rho_{жс} \cdot V \cdot \omega^2 \cdot R,$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости;  
 $\omega$  – круговая частота вращения.

**2 – центробежная сила инерции**, направленная от оси вращения, равная:

$$F_{цб} = m_ч \cdot a_{цс} = \rho_ч \cdot V \cdot \omega^2 \cdot R,$$

где  $\rho_ч$  – плотность частицы.

Найдем равнодействующую этих сил:  $\vec{F}_p = \vec{F}_{цс} + \vec{F}_{цб}$



В проекции на ось ОХ она равна:

$$F_p = F_{цб} - F_{цс} = (\rho_ч - \rho_{жс}) \cdot V \cdot \omega^2 \cdot R \quad (2.18)$$

В результате также возможны два случая:

1) если  $\rho_ч > \rho_{жс} \Rightarrow F_p > 0$ , то частица движется от оси вращения на дно пробирки;

2) если  $\rho_ч < \rho_{жс} \Rightarrow F_p < 0$ , то частица движется к оси вращения и поднимается на поверхность жидкости.

Найдя отношение результирующих сил (2.17) и (2.18), получим коэффициент разделения:

$$K = \frac{(\rho_ч - \rho_{жс}) \cdot V \cdot \omega^2 \cdot R}{(\rho_ч - \rho_{жс}) \cdot V \cdot g} = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (2.19)$$

В современных ультрацентрифугах число оборотов достигает 50000 в минуту, следовательно, коэффициент разделения достигает значения  $2 \cdot 10^5$ . При таком коэффициенте разделения оказывается возможным отделить от протоплазмы некоторые органоиды клетки и выделить их в чистом виде.

Центрифуги, применяемые в промышленности, отличаются от лабораторных более сложным устройством ротора, позволяющим центрифугировать большое количество материала одновременно или же вести процессы разделения непрерывно. В сельском хозяйстве центрифуги применяют для очистки зерна, выдавливания меда из сот, выделения жира из молока, в промышленности - для обогащения руд. В клинических и санитарно-гигиенических лабораториях центрифугирование используют для отделения эритроцитов от плазмы крови, сгустков крови - от сыворотки, плотных частиц - от жидкой части мочи и т. д.

Центрифуги с небольшой скоростью вращения ротора употребляют в медицине и ветеринарии для отделения осадков мочи, осаждения эритроцитов, при серологических исследованиях и т. д.

#### 1.4. Некоторые вопросы биомеханики

*Опорно-двигательный аппарат человека и животного – это система сочлененных между собой костей скелета, к которым в определенных точках прикреплены мышцы.*

Скелет человека состоит из 206 костей (85 парных и 36 непарных), которые соединены суставами и связками. Это **пассивная часть** опорно-двигательного аппарата. Поперечнополосатые скелетные мышцы, которых более 600 – это его **активная часть**, приводящая в движение костные зве-

ня. Управляет костно-мышечным аппаратом центральная нервная система.

Движение осуществляется системой костных рычагов.

**Рычаг** - это твердое тело, имеющее ось вращения, к которому приложены силы, создающие моменты сил, относительно этой оси.

Таким образом, с точки зрения биомеханики, опорно-двигательный аппарат представляет собой совокупность рычагов.

**Условие равновесия рычага:** сумма всех моментов сил, действующих на рычаг, должна быть равна нулю.

В опорно-двигательном аппарате рычаг находится в равновесии, если момент силы тяжести равен моменту силы тяги мышц:

$$M_T = M_M,$$

где  $M_T = F_T \cdot b$  – момент силы тяжести;

$M_M = F_M \cdot a$  – момент силы тяги мышечной системы.

Следовательно, **условие равновесия рычага** примет вид:

$$F_M \cdot a = F_T \cdot b, \quad (2.20)$$

где  $F$  – сила тяги мышц;

$a$  – плечо силы тяги мышц;

$F_T$  – сила тяжести;

$b$  – плечо силы тяжести.

**Различают следующие виды рычагов:**

### 1. Рычаг равновесия

Силы приложены по обе стороны от точки опоры (рисунок 2.9).

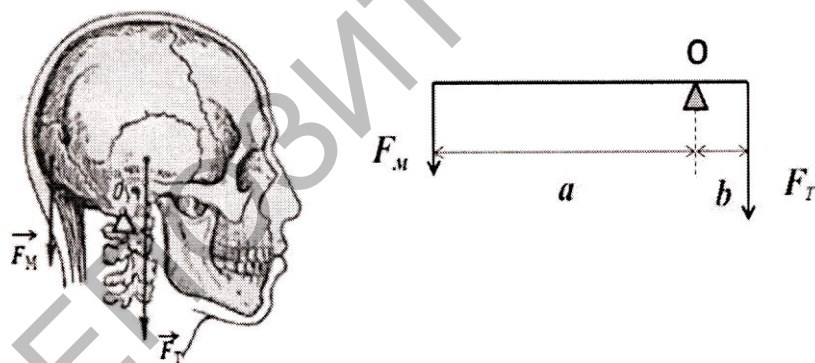


Рисунок 2.9

$F_M$  тяги мышц и связок, прикрепленных к затылочной кости.

Спереди от точки опоры на относительно коротком плече действует сила тяжести головы  $F_T$ , приложенная к центру масс черепа, а позади от точки опоры действует сила

Условие равновесия рычага:  $F_M \cdot a = F_T \cdot b$

Пример - череп, рассматриваемый в сагиттальной плоскости. Ось вращения  $O$  рычага проходит через сочленение черепа с первым шейным позвонком.

## 2. Рычаг силы

Сила  $F_M$  приложена на конце рычага, сила  $F_T$  ближе к точке опоры (рисунок 2.10).

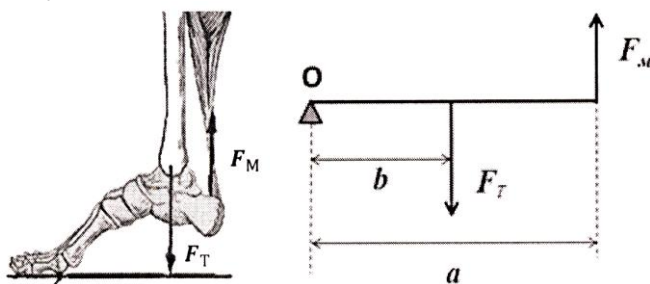


Рисунок 2.10

Условие равновесия:

$F_M \cdot a = F_T \cdot b$ , но  $a > b$ , следовательно,  $F_M < F_T$ . Таким образом, *рычаг дает выигрыш в силе*, поэтому называется **рычагом силы**.

Пример - свод стопы при подъеме на полупальцы. Ось вращения проходит через головки плюсневых ко-

стей. Сила тяжести тела  $F_T$  приложена к таранной кости, а сила тяги мышц  $F_M$ , осуществляющая подъем тела, передается через ахиллово сухожилие и приложена к выступу пяточной кости.

## 3. Рычаг скорости

Сила  $F_M$  приложена ближе к точке опоры, чем сила  $F_T$  (рисунок 2.11а).

Условие равновесия :  $F_M \cdot a = F_T \cdot b$ , но  $a < b$ , следовательно,  $F_M > F_T$ , т. е. *рычаг дает проигрыш в силе за счет выигрыша в перемещении*, а значит - и *выигрыш в скорости*, поэтому называется **рычагом скорости**.

Пример - кости предплечья. Точка опоры находится в локтевом суставе.

Если сила мышц  $F_M$  действует под углом  $\alpha \neq 90^\circ$  (рисунок 2.11б), то *условие равновесия рычага* будет иметь вид:

$$F_M \cdot a \cdot \sin \alpha = F_T \cdot b \quad (2.21)$$

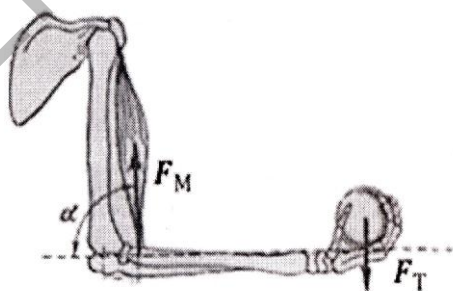
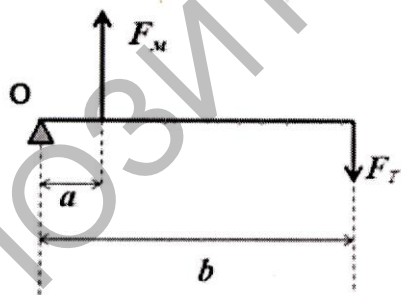


Рисунок 2.11а

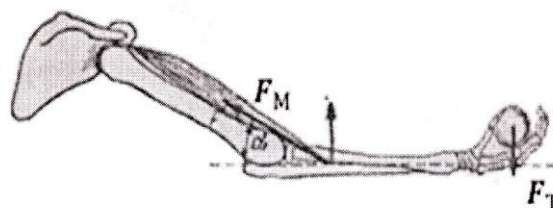
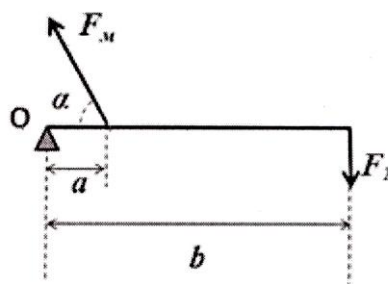


Рисунок 2.11б

Основной характеристикой сустава является **число степеней свободы** - равное числу осей, вокруг которых возможно взаимное вращение сочлененных костей.

В общем случае, **числом степеней свободы** любой механической системы называют число независимых координат, необходимых для описания перемещения системы в пространстве.

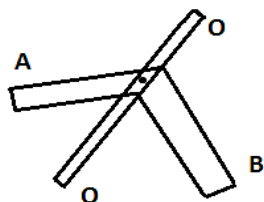


Рисунок 2.12

Рассмотрим систему из двух звеньев  $A$  и  $B$ , соединенных осью  $OO$  (рисунок 2.12).

**Это одноосное двухзвеньеое соединение.**

При неподвижном звене  $A$  звено  $B$  имеет одну степень свободы. Примером такого соединения в организме человека и некоторых животных являются надпяточное, фаланговое и плечелоктевое соединения. Они допускают только возможность сгибания и разгибания с одной степенью свободы.

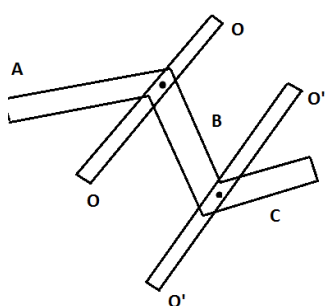


Рисунок 2.13

Рассмотрим трехзвеньеое соединение элементов  $A$ ,  $B$  и  $C$  с осями  $OO$  и  $O'O'$  (рисунок 2.13).

При одном направлении осей система называется **одноосной**. В одноосной трехзвенной системе закрепленное звено не имеет свободы перемещения, второе звено имеет одну степень свободы и третье – две. Фаланги пальцев соединены суставами, представляющими одноосные соединения. Ногтевая фаланга имеет две степени свободы относительно основной и одну степень относительно средней.

**Двухосное** соединение допускает вращение звеньев по двум взаимно перпендикулярным осям. Оно имеет две степени свободы.

При неподвижном звене  $A$  звено  $B$  обладает одной степенью свободы. Звено  $C$ , вращаясь вокруг оси  $O'O'$ , имеет уже две степени свободы. Примером такого соединения является лучезапястный сустав, в котором осуществляется сгибание и разгибание, а также приведение и отведение кисти.

**Трехосное** соединение осуществляет вращение вокруг трех взаимно перпендикулярных осей и называется «шаровой шарнир» (рисунок 2.14). Оно имеет три степени свободы. Такое соединение осуществлено в тазобедренном суставе, в лопаточно-плечевом суставе.

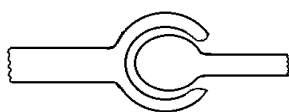


Рисунок 2.14

Присоединение новых звеньев увеличивает подвижность и число степеней свободы. Так, например, череп имеет шесть степеней свободы, благодаря некоторой подвижности межпозвоночных суставов.

Если рассматривать скелет как совокупность отдельных звеньев, соединенных в один организм,

то окажется, что все звенья при нормальной стойке образуют систему, находящуюся в крайне неустойчивом равновесии. Так, опора туловища представлена шаровыми поверхностями тазобедренного сочленения. Центр масс туловища расположен выше опоры, что при шаровой опоре создает неустойчивое равновесие. То же относится и к коленному и к голеностопному соединению.

Центр масс тела человека расположен при нормальной стойке как раз на одной вертикали с центрами тазобедренного, коленного и голеностопного сочленений ноги, на 2-2,5 см ниже мыса крестца и на 4-5 см выше тазобедренной оси. Таким образом, это самое неустойчивое состояние нагроможденных звеньев скелета. И вся система держится в равновесии только благодаря постоянному напряжению поддерживающих систему мышц.

### Тема № 3. Механические колебания и волны. Биоакустика

#### 3.1. Колебательное движение в природе. Гармонические колебания и их характеристики. Уравнения смещения, скорости, ускорения. Энергия колеблющегося тела

*Колебательным* называется движение, при котором тело, многократно отклоняясь от своего положения равновесия, каждый раз вновь возвращается к нему.

Если возвращение осуществляется через равные промежутки времени, то такие колебания называются *периодическими*.

Колебательные движения широко распространены в природе. Морские приливы и отливы, биение сердца, дыхание, колебания земной коры во время землетрясений, тепловое движение ионов кристаллической решетки твердого тела и т.д.

Несмотря на разнообразие колебательных процессов как по физической природе, так и по степени сложности, все они могут быть сведены к совокупности простейших периодических колебаний, называемых гармоническими.

*Гармоническими* называют колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется в зависимости от времени по закону синуса или косинуса.

#### Характеристики гармонических колебаний:

1) *смещение  $x$*  – это отклонение тела от положения равновесия в любой момент времени  $t$ ;

единица измерения - *метр*:  $[x] = \text{м}$ ;

2) *амплитуда  $x_0$*  – это максимальное смещение;

единица измерения - *метр*:  $[x_0] = \text{м}$ ;

3) *период  $T$*  - время одного полного колебания;

измеряется в *секундах*:  $[T] = \text{с}$ ;

4) *частота  $\nu$*  - число колебаний за единицу времени;

измеряется в *герцах*:  $[\nu] = \text{Гц}$ ;

Период и частота связаны между собой соотношением:

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (3.1)$$

5) *круговая или циклическая частота  $\omega$*  – это число колебаний за  $2\pi$  с:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu \quad (3.2)$$

б) *фаза  $\varphi$*  определяет положение тела в данный момент времени  $t$ :

$$\varphi = \omega \cdot t$$

измеряется в *радах*:  $[\varphi] = \text{рад}$ ;

7) **начальная фаза  $\varphi_0$**  определяет положение тела в начальный момент времени (при  $t=0$ ). Обычно значения  $\varphi_0$  лежат от  $-\pi$  до  $+\pi$  рад.

Пусть материальная точка совершает гармонические колебания. Тогда **уравнение гармонического колебания материальной точки (уравнение смещения) имеет вид:**

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3.3)$$

Если гармонические колебания точка начала совершать из положения равновесия, т.е. если начальная фаза  $\varphi_0 = 0$ , то **уравнение гармонических колебаний** примет вид:

$$x = x_0 \cdot \sin \omega t \quad (3.4)$$

Тогда **уравнение скорости точки при гармоническом колебании** имеет вид:

$$v = x_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3.5)$$

**Максимальная скорость (амплитуда скорости):**

$$v_0 = x_0 \cdot \omega \quad (3.6)$$

Следовательно, **уравнение скорости точки при гармоническом колебании** имеет вид:

$$a = -x_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad a = -x \cdot \omega^2 \quad (3.7)$$

**Максимальное ускорение (амплитуда ускорения):**

$$a_0 = x_0 \cdot \omega^2 \quad (3.8)$$

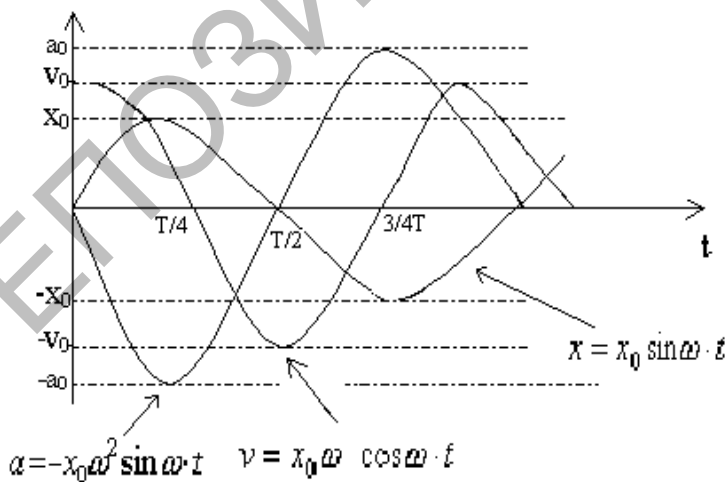


Рисунок 3.1

На рисунке 3.1 представлены графики смещения  $x$ , скорости  $v$  и ускорения  $a$  от времени  $t$ .

**Выводы из графика:**

- 1) амплитуды колебаний смещения, скорости и ускорения различны, а круговая частота и период у них одинаковые;
- 2) фазы колебаний этих величин также различны: колебание скорости опережает колебание

смещения по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ , а колебание ускорения опережает колебания смещения по фазе на  $\pi$ , т.е. они находятся в противофазе.

Знак «минус» означает, что ускорение колеблющейся точки направлено в сторону, противоположную смещению, т.е. ускорение всегда направлено к положению равновесия колеблющейся точки.

При гармоническом колебании происходит периодическое взаимное превращение кинетической энергии колеблющегося тела  $E_k$  и потенциальной энергии  $E_n$ , обусловленной действием возвращающей силы. Когда кинетическая энергия максимальна, то потенциальная равна нулю, и наоборот.

Следовательно, полная энергия складывается из кинетической и потенциальной энергий:

$$E_{\text{полн}} = E_k + E_n = E_{k \text{ max}} = E_{n \text{ max}}$$

Определим **полную энергию колебания** из условия, что полная энергия равна максимальной кинетической энергии:

$$E_{\text{полн}} = E_{k \text{ max}} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}, \text{ а т.к. } v_0 = x_0 \cdot \omega, \text{ то}$$

$$E_{\text{полн}} = \frac{m \cdot x_0^2 \cdot \omega^2}{2} \quad (3.9)$$

При отсутствии сил трения полная энергия гармонического колебания в любой момент времени остается величиной постоянной.

### 3.2. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс

В реальных условиях кроме возвращающей силы в колеблющейся системе будут действовать силы трения и сопротивления.

*Колебания, которые происходят под действием сил сопротивления окружающей среды, называются затухающими колебаниями.*

При таких колебаниях часть полной энергии расходуется на преодоление сил сопротивления и рассеивается в окружающей среде. В результате уменьшаются амплитуда и частота колебаний.

**Амплитуда затухающих колебаний** с течением времени уменьшается по экспоненциальному закону:

$$x_{0t} = x_0 \cdot e^{-\beta t}, \quad (3.10)$$

где  $x_{0t}$  - амплитуда в любой момент времени  $t$ ;

$x_0$  - амплитуда в начальный момент времени;

$e = 2,72$  - основание натурального логарифма;

$\beta$  (греч. «бета») - коэффициент затухания, зависящий от природы среды и ее температуры;

$t = nT$  - время, где  $n$  - порядковые числа,  $T$  - период колебания.



Сами затухающие колебания происходят по гармоническому закону. **Уравнение затухающего колебания** имеет вид:

$$x = x_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (3.11)$$

где  $\omega$  - круговая частота затухающих колебаний;  
 $\varphi_0$  - начальная фаза.

**Круговая частота затухающих колебаний** определяется по формуле:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2},$$

где  $\omega_0$  - круговая частота в начальный момент времени.

**Период затухающих колебаний:**

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \dots\dots\dots (3.12)$$

На рисунке 3.2 представлен график смещения при затухающих колебаниях: сами колебания происходят по закону синуса, а их амплитуда уменьшается по экспоненциальному закону.

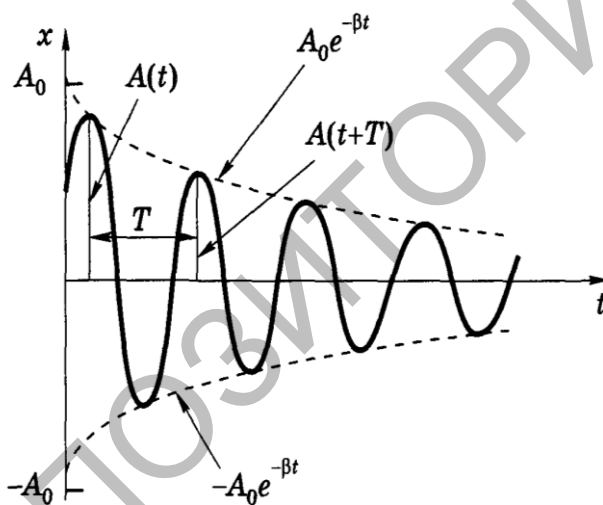


Рисунок 3.2

Сначала проводят вспомогательные линии экспоненциально убывающей амплитуды, а потом рисуют график синуса так, чтобы амплитуда синусоиды не выходила за пределы вспомогательных линий.

Колебания в системе могут возникать при условии, если сопротивление среды незначительно, т.е.  $\alpha \ll \omega_0$ . С ростом коэффициента затухания период колебаний увеличивается и при  $\alpha = \omega_0$  обращается в бесконечность. Движение перестает быть периодическим.

В этом случае выведенная из положения равновесия система возвращается в положение равновесия, не совершая колебаний. Такое движение называется **апериодическим**.

Примером аperiodического движения является спад заряда на мембранах нервных волокон человека и животных (рисунок 3.3).

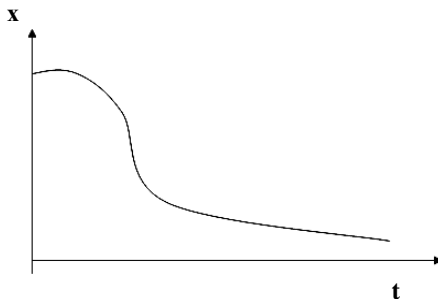


Рисунок 3.3

Для того чтобы система совершала незатухающие колебания, необходимо периодически пополнять извне потери энергии колебания на трение.

Для этого надо воздействовать на систему периодически изменяющейся **вынуждающей силой**:

$$F_e = F_0 \cdot \sin \omega_e t \quad (3.13)$$

Колебания, происходящие под действием вынуждающей силы, называются **вынужденными**.

Вынуждающие колебания происходят с частотой, равной частоте вынуждающей силы.

Выведем уравнение вынужденных колебаний.

На колебательную систему действуют 2 силы: собственная возвращающая сила  $F_c$  и вынуждающая  $F_e$ . В результате система приобретает вынужденное ускорение  $a_e$ .

Запишем 2-й закон Ньютона:  $F_e + F_c = m \cdot a_e$

Подставив в него выражение для внешней силы и для собственной возвращающей силы, получим:

$$F_0 \cdot \sin \omega_e \cdot t + m \cdot a_c = m \cdot a_e \quad (3.14)$$

Учтем уравнение связи ускорения и смещения при гармонических колебаниях (3.7):

$$a_c = -x \cdot \omega_c^2; \quad a_e = -x \cdot \omega_e^2$$

Затем подставим эти уравнения в (3.14):

$$F_0 \cdot \sin \omega_e \cdot t - m \cdot x \omega_c^2 = -m \cdot x \omega_e^2$$

Преобразуем:  $F_0 \cdot \sin \omega_e \cdot t = m \cdot x (\omega_c^2 - \omega_e^2)$

И выразим смещение при вынужденных колебаниях:

$$x = \frac{F_0}{m \cdot (\omega_c^2 - \omega_e^2)} \cdot \sin \omega_e \cdot t \quad (3.15)$$

Полученное выражение (3.15) и есть *уравнение вынужденного колебания*.

*Амплитуда вынужденного колебания:*

$$x_0 = \frac{F_0}{m \cdot (\omega_c^2 - \omega_s^2)} \quad (3.16)$$

Если  $\omega_s \approx \omega_c$ , тогда  $\omega_s^2 - \omega_c^2$  будет равно бесконечно малому числу. При делении  $F_0$  на бесконечно малое число получится бесконечно большое число, т.е. произойдет резкое возрастание амплитуды  $x_0 \rightarrow \infty$  и наступит резонанс.

**Резонанс** – это резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты внешней вынуждающей силы к собственной частоте колебательной системы.

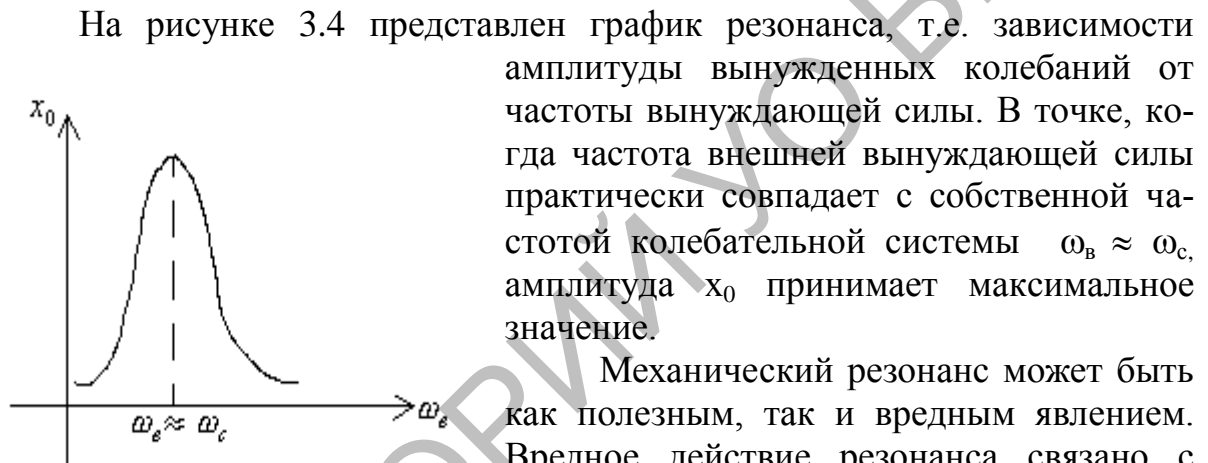


Рисунок 3.4

Механический резонанс может быть как полезным, так и вредным явлением. Вредное действие резонанса связано с сильными вибрациями и разрушением, которое он может вызвать. Поэтому его влияние учитывают при строении зданий, опор, мостов, конструкций механизмов и т.д. Положительная роль резонанса заложена в основе работы слухового аппарата.

Существуют также колебательные системы, в которых поддерживаются незатухающие колебания собственной частоты. Такие системы называются **автоколебательными**, а происходящие в них колебания - **автоколебаниями**. В автоколебательных системах часто происходят **релаксационные колебания**.

**Релаксация** - это процесс постепенного возвращения физической системы в равновесное состояние, из которого она была выведена быстрым действием внешней силы.

Релаксационные колебания характерны для многих процессов, происходящих в организме, например, дыхательные движения грудной клетки, сокращение и расслабление мышцы сердца, пульсовые колебания стенок артерии.

Частоты колебаний внутренних органов человека и животных лежат в интервале от 1 до 20 Гц. Например, частота собственных колебаний тела

человека в положении лежа 3-4 Гц, а в положении стоя – от 5 до 12 Гц. Частота собственных колебаний грудной клетки от 5 до 8 Гц, а брюшной полости от 3 до 4 Гц. Следовательно, воздействие внешних низкочастотных вибраций (например, от двигателей доильных установок или воздуходувов) на организм могут приводить к возникновению различных заболеваний. При частотах от 4 до 10 Гц речь человека искажается, а иногда прерывается. Особо опасны вибрации с частотой, совпадающей с собственной частотой внутренних органов 6-9 Гц, которые могут вызвать механическое повреждение или даже разрыв органов.

Систематическое воздействие общих вибраций в резонансной или околорезонансной зоне может быть причиной стойких нарушений физиологических функций организма. Эти нарушения проявляются в виде головных болей, головокружения, плохого сна, пониженной работоспособности, плохого самочувствия и нарушения сердечной деятельности.

Локальная вибрация малой интенсивности может оказывать и благоприятное воздействие на организм человека, к примеру, улучшая функциональное состояние центральной нервной системы, ускоряя заживление ран. При увеличении интенсивности колебаний, длительности их воздействия возникают изменения, приводящие в ряде случаев к развитию профессиональной патологии - вибрационной болезни. Выраженность и характер нарушений определяются в первую очередь спектральными и амплитудными параметрами вибрации, а также условиями труда, при которых это воздействие происходит.

К медико-биологическим и общеоздоровительным мероприятиям профилактики вибрационной патологии относятся: тепловые процедуры для рук в виде гидропроцедур или сухого воздушного обогрева, массаж и самомассаж рук и плечевого пояса, производственная гимнастика; ультрафиолетовое облучение, витаминпрофилактика и другие мероприятия общеукрепляющего характера, например, комната психологической разгрузки, кислородный коктейль и др.

### **3.3. Механические волны. Перенос энергии волной**

Если какое-либо тело совершает колебания в упругой среде, то оно взаимодействует с частицами среды и заставляет их совершать вынужденные колебания.

С течением времени все более удаленные частицы от источника вовлекаются в колебательное движение. При этом частицы среды не вовлекаются в поступательное движение, а лишь колеблются около своего положения равновесия. Поэтому распространение волны не сопровождается переносом вещества.

*Механическая волна – это механическое колебание, распространяющееся в упругой среде и несущее с собой энергию.*

Различают два вида механических волн (рисунок 3.5):

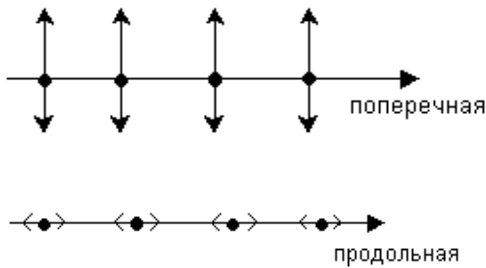


Рисунок 3.5

1. **Поперечные волны** - волны, в которых частицы среды совершают колебания перпендикулярно направлению распространения волны.

Поперечные волны распространяются в твердых телах и жидкостях.

2. **Продольные волны** - волны, в которых частицы среды совершают колебания вдоль направления

распространения волны.

Продольные волны распространяются в твердых телах и газах.

Пусть от источника во всех направлениях идет волна (рисунок 3.6).

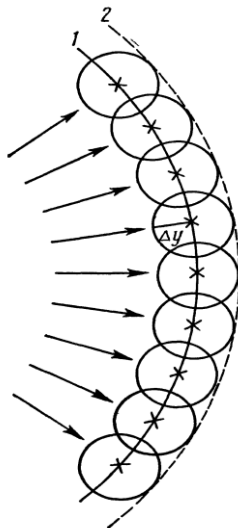


Рисунок 3.6

**Луч** - линия, которая указывает направление распространения волны.

**Фронт волны** - геометрическое множество точек, до которых дошла волна в данный момент времени.

Фронт волны может быть **сферическим** и **плоским**.

Распространение волны объясняется **принципом Гюйгенса-Френеля**: каждая точка среды, до которой дошла волна, сама становится источником вторичных сферических волн, которые в боковом направлении гасятся, а в направлении движения усиливаются.

**Касательная к вторичным сферическим волнам называется вторичным фронтом волны.**

Пусть на расстоянии  $y$  от источника (точка  $O$ ) совершает колебания точка  $C$  (рисунок 3.7). Найдем ее смещение  $x$  относительно положения равновесия. Если точка  $O$  колеблется  $t$  с, то точка  $C$  будет совершать колебания  $(t - t_1)$  с, где  $t_1$  - время, за которое волна дошла до точки  $C$ .

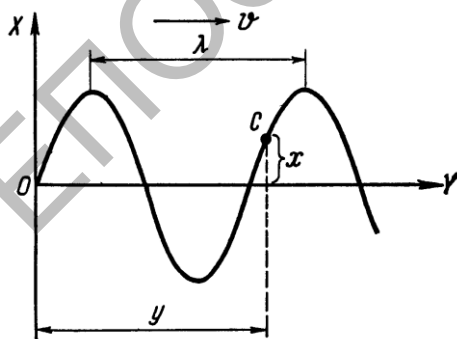


Рисунок 3.7

Используя уравнение смещения при гармонических колебаниях (3.2), получим уравнение смещения любой точки среды, через которую проходит волна на расстоянии  $y$  от источника волны:

$$x = x_0 \cdot \sin \omega(t - t_1)$$

Учтем, что время прохождения волной расстояния  $y$  со скоростью  $v$   $t_1 = \frac{y}{v}$ ,

тогда **уравнение волны** примет вид:

$$x = x_0 \cdot \sin \omega \cdot \left( t - \frac{y}{v} \right) \quad (3.17)$$

Если выбрать определенный момент времени  $t$ , то уравнение волны дает величину смещений точек среды вдоль направления  $OX$ .

График этой зависимости  $x = f(y)$  называется **графиком волны**.

#### **Характеристики механической волны:**

Кроме амплитуды, смещения, периода и частоты, волны характеризуются фазовой скоростью и длиной волны.

**Фазовой скоростью**  $v$  (скоростью) волны называется скорость, с которой в среде перемещаются одинаковые фазы колебания частиц.

**Длиной волны**  $\lambda$  называется расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одинаковых фазах. Это расстояние волна проходит за время, равное одному периоду:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu} \quad (3.18)$$

Единица измерения длины волны в СИ – **метр**:

$$[\lambda] = \text{м}$$

Распространение волны сопровождается переносом энергии, включающей в себя кинетическую энергию колеблющихся частиц и потенциальную энергию упругой деформации среды.

Следовательно, в некотором объеме  $V$  упругой среды можно определить **среднюю энергию**, переносимую волной, по формуле:

$$E_{cp.} = \frac{m \cdot x_0^2 \cdot \omega^2}{2}, \quad (3.19)$$

где  $m$  – масса выделенного объема среды.

**Средняя плотность энергии** – это величина, равная средней энергии, распространяемой в единице объема:

$$\varepsilon = \frac{E_{cp.}}{V} = \frac{\rho \cdot x_0^2 \cdot \omega^2}{2}, \quad (3.20)$$

где  $\rho$  – плотность среды;

$x_0$  – амплитуда;

$\omega$  – циклическая частота.

Единица измерения средней плотности энергии – **джоуль на метр кубический**:

$$[\varepsilon] = \text{Дж/м}^3$$

**Интенсивность волны** – это величина, численно равная средней энергии волны, переносимой за единицу времени  $t$  через единицу площади  $S$ , перпендикулярной распространению волны:

$$I = \frac{E_{\text{ср.}}}{S \cdot t} \quad (3.21)$$

Единицей измерения является **ватт на квадратный метр**:

$$[I] = \text{Вт}/\text{м}^2$$

При своем распространении в среде волна расходует свою энергию на преодоление сопротивления среды, а ее интенсивность изменяется по **закону Бугера**: интенсивность волны уменьшается по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot d}, \quad (3.22)$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность;

$I$  – интенсивность волны на расстоянии  $d$  от источника;

$k$  – коэффициент поглощения (различный для разных упругих сред).

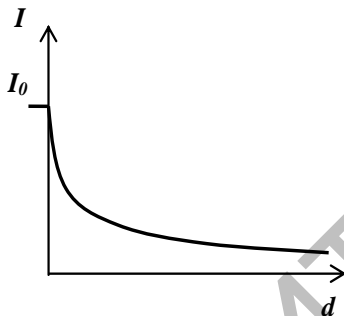


Рисунок 3.8

На рисунке 3.8 представлен график закона Бугера. Из графика видно, что при больших расстояниях  $d$  от источника интенсивность волны стремится к нулю. Скорость убывания экспоненциального графика зависит от коэффициента поглощения среды  $k$ . Чем больше  $k$  – тем быстрее убывает интенсивность волны. Кроме этого, энергия волны убывает с увеличением расстояния от источника. Иначе, говорят, что энергия **диссипирует** в окружающую среду.

### 3.4. Биоакустика. Звук и его характеристики

**Биоакустика** - это раздел механики, изучающий получение, распространение и взаимодействие звуковых волн с биологическими средами, а также влияние звуковых волн на биосистемы и применение их в лечебных и исследовательских целях.

**Звук** - продольные волны с частотами от 16 до 20000 Гц, воспринимаемые органами слуха человека.

Звуковые волны с частотой  $\nu > 20000$  Гц называются **ультразвуком**, а с частотой  $\nu < 16$  Гц - называются **инфразвуком**.

Скорость звука в воздухе при  $0^{\circ}\text{C}$  равна  $v=331,6$  м/с. В жидких средах и мягких тканях организма скорость составляет около 1500 м/с, в твердых телах - от 3000 до 6000 м/с.

Источником звука может быть любое тело, совершающее колебания в результате каких-либо механических воздействий. Например, камертоны, струны, мембраны, трубы, сирены и др.

В животном мире органы звукоизлучения весьма разнообразны. Например, *членистоногие* издают звуковые сигналы трением или ударами одних органов о другие (фрикционный или ударный механизм), вибрацией мембраны (крыльев), пропусканием воздуха через отверстия. *Рыбы* значительную часть звуков издают при движении в результате срыва водяных вихрей с поверхности их тела. Специфические звуки издаются при захвате рыбами пищи, а также плавательным пузырем. Многие безголосые птицы обладают «инструментальным» голосом, т.е. испускание звуков происходит с участием клюва, лап, крыльев. Но основную роль в качестве сигнала общения у птиц выступает дыхательный голос, источником которого является нижняя гортань. *Млекопитающие* издают звук с помощью колебания голосовых связок. Роль резонатора выполняют гортанные мешки, ротовая и носовая полости и даже легкие.

Звуки, издаваемые птицами, лежат в диапазоне от 200 Гц до 12 кГц, но некоторые могут издавать до 50 кГц. У млекопитающих диапазон шире: от нескольких Гц до сотен кГц (у летучих мышей).

У большинства животных для восприятия звуковых волн имеются специальные органы. Самым примитивным органом слуха является триходная сенсилла у насекомых. Наибольшего совершенства в процессе эволюции достигло ухо млекопитающих. У них звуковые волны воспринимает улитка, в которой находится мембрана, состоящая из 10 тысяч волокон, каждое из которых имеет свою резонансную частоту, поэтому *механизм возникновения слухового ощущения – резонансный*.

Звуки разделяют на тоны или музыкальные звуки, шумы и звуковые удары.

*Тон – это звук с постоянной или периодически изменяющейся во времени частотой.*

Состоит из основного тона и обертонов. Основной тон имеет постоянную частоту. Частота обертонов равна  $2\nu$ ,  $3\nu$ ,  $4\nu$ .

*Шумом называют звук, отличающийся сложной, неповторяющейся во времени зависимостью частоты и амплитуды (шорох, скрип, аплодисменты и т.п.).*

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

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

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



$$I = \frac{E}{S \cdot t} \quad (3.23)$$

Единица измерения в СИ – **ватт на квадратный метр**:

$$[I] = \text{Вт/м}^2$$

**Звуковое давление** – это избыточное над атмосферным давление, которое возникает в среде при прохождении звуковых волн.

Для плоской гармонической волны:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho \cdot v}, \quad (3.24)$$

где  $p_0$  – амплитудное значение звукового давления;

$\rho$  – плотность среды;  $v$  – скорость звука в среде;

$\rho v$  – акустическое сопротивление среды.

Органы слуха человека и животных могут воспринимать акустические колебания не только в определенном диапазоне частот, но и в ограниченном диапазоне интенсивностей.

Для того чтобы волны звуковой частоты создали ощущение звука, необходимо, чтобы интенсивность превышала некоторую минимальную величину  $I_0$ , называемую **порогом слышимости**.

При частоте  $\nu = 1 \text{ кГц}$   $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ ,  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ .

Максимальная интенсивность колебаний, воспринимаемая субъективно как звук, при превышении которой возникает ощущение боли, называется **порогом болевого ощущения**  $I_{\text{max}}$ .

При частоте  $\nu = 1 \text{ кГц}$   $I_{\text{max}} = 10 \text{ Вт/м}^2$ ,  $p_0 = 60 \text{ Па}$ .

$$\text{Отношение } \frac{I_{\text{max}}}{I_0} = 10^{13}$$

В связи с этим введена величина **уровня интенсивности звука**.

**Уровень интенсивности** – это десятичный логарифм отношения данной интенсивности звука к порогу слышимости:

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \quad (3.25)$$

Единица измерения в СИ – **бел**:

$$[L] = \text{Б}$$

На практике пользуются десятой частью бела – **децибелом**:

$$\text{дБ} = 0,1 \text{ Б}$$

Тогда **уровень интенсивности звуковой волны**:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \quad \text{или} \quad L = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \quad (3.26)$$

Порог слышимости  $I_0$  имеет уровень интенсивности  $L = 0$  дБ, а болевой порог  $I_{max}$  – уровень интенсивности  $L = 130$  дБ.

Звук, доходя до органов слуха, вызывает слуховое ощущение, которое характеризуется **субъективными характеристиками**.

**Высота звука** оценивается по частоте звука (чем больше частота, тем выше тон).

**Тембр (окраска звука)** определяется спектральным составом звука (частотами и амплитудами).

**Громкость** зависит от интенсивности и частоты звука.

В основе определения громкости звука лежит **психофизический закон Вебера-Фехнера**: уровень громкости (при определенной частоте) прямо пропорционален десятичному логарифму отношения его интенсивности  $I$  к порогу слышимости  $I_0$ :

$$E = k \cdot L = k \cdot 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}, \quad (3.27)$$

где  $L$  – уровень интенсивности;

$\frac{I}{I_0}$  – относительная сила раздражения;

$k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты.

Единицей измерения уровня громкости является **фон**:

$$[E] = \Phi$$

Согласно закону Вебера - Фехнера, увеличение раздражения в геометрической прогрессии вызывает увеличение его ощущения в арифметической прогрессии.

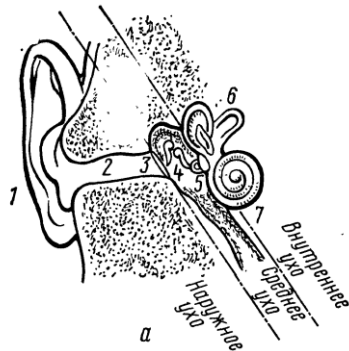
При частоте  $\nu = 1 \text{ кГц}$   $k = 1$  закон Вебера-Фехнера примет вид:

$$E = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \quad (3.28)$$

Следовательно, при частоте  $\nu = 1 \text{ кГц}$  уровень интенсивности в дБ и уровень громкости в фонах совпадают:  $L = E$ .

При других частотах в области слышимости для перехода от децибел к фонам необходимо вводить соответствующие поправки.

Ухо человека и животного неодинаково 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 не способен воспринимать звуки с частотой выше 12 - 14 кГц. В пределах частоты 1000 - 3000 Гц чувствительность наибольшая. Она снижается к частоте 16 Гц и 20 кГц. В результате область слышимости ограничена как сверху, так и снизу причудливыми кривыми (рисунок 3.9).

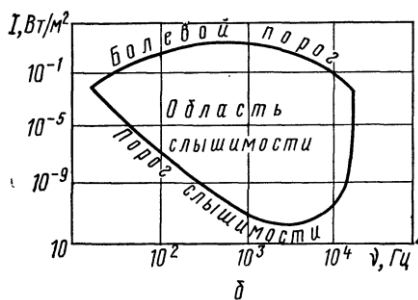


Рисунок 3.9

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, т.е. в сторону

более высоких частот. Так, собаки воспринимают звуки с частотами до 30 кГц, комары и летучие мыши - до 60 кГц и более.

Интересен тот факт, что верхний абсолютный предел чувствительности слухового анализатора животных находится ниже верхней границы слухового анализатора человека, то есть болевой порог у многих животных достигается раньше, чем у человека. Поэтому сильный шум такие животные, как кошки, собаки, а также некоторые виды птиц воспринимают как болевые сигналы.

В связи с механизацией производственных процессов в животноводческих и птицеводческих комплексах значительно возросли шумы по сравнению с естественными условиями обитания животных. Источниками шума являются мобильные кормораздатчики, отопительно-вентиляционные агрегаты, вакуум-насосы, доильные установки и пр. Например, шум на птицефабриках и свиноводческих комплексах достигает до 95 дБ.

Для живых организмов интенсивный шум является стресс-фактором, который оказывает негативное влияние. Его действие вызывает нарушение работы слухового аппарата и органов внутренней секреции, расстройство нервной системы и пищеварения, возникновение сердечно-сосудистых заболеваний. В результате происходит потеря сельскохозяйственных полезных качеств: снижаются удои коров, привес и приплод у свиноматок.

Исследования на птицефабриках показали, что особенно неблагоприятно влияет на кур-несушек шум в 90-100 дБ при частоте 2-5 кГц, создаваемый вентиляторами. Его воздействие вызывает резко выраженные изменения в физиологическом состоянии кур, снижение их живой массы и яйценоскости.

*Интенсивность звука измеряют приборами, называемыми шумомерами.*

*Исследование остроты слуха называется аудиометрией. С помощью прибора аудиометра определяют порог слухового ощущения на разных частотах. Полученный график называют аудиограммой. Затем аудиограмму сравнивают с нормальной кривой порога слышимости и делают заключение.*

#### **4.5. Звуковые методы исследования в клинике. Биофизика ультразвука и инфразвука**

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

*Непосредственное выслушивание звуков, возникающих внутри организма, составляет один из важнейших приемов клинического исследования и называется аускультацией (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 полый 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 – **фонокардиографии** (ФКГ) - *графической регистрации тонов и шумов сердца с целью их диагностической интерпретации.* Запись производится с помощью 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 (плотность, упругость, наличие полостей) тканей, находящихся вблизи места, по которому производится постукивание. По тону перкуторных звуков определяют состояние и топографию внутренних органов.

**Инфразвуком** называют звуковые колебания с частотой до 16 Гц.

Источником инфразвука в природе являются грозовые разряды, обвалы, взрывы, землетрясения. Инфразвук не воспринимается человеческим ухом, т.к. вызываемые им колебания барабанной перепонки слишком мед-

ленные и он не может вызвать колебания волокон основной мембраны, связанных со слуховым нервом. Однако инфразвуковые волны воспринимают некоторые животные: коты, собаки, змеи.

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

Инфразвук обладает биологическим действием. Механизм действия инфразвука имеет резонансную природу. Особенно опасно воздействие инфразвука в диапазоне частот от 2 до 17 Гц, т.к. в этом диапазоне находятся частоты собственных колебаний внутренних органов, и он вызывает вынужденные колебания этих органов. Так, например, частота колебаний мозга - 9 Гц, печени и почек - 12 Гц, глазного дна - 7 Гц. Особенно следует отметить резонанс инфразвука на частоте 7 Гц с колебаниями  $\alpha$ -волн мозга. Тогда он даже при небольших интенсивностях вызывает расстройство органов зрения, тошноту, общую слабость. При средних мощностях (140-155 дБ) регистрируют обмороки, временную потерю зрения, снижение продуктивности крупного рогатого скота. При еще больших мощностях (порядка 180 дБ) наблюдается разрыв кровеносных сосудов, возникают параличи, приводящие к смертельным поражениям. Кроме этого, инфразвук оказывает психическое воздействие на человека и животных, что выражается в чувстве тревоги, страха.

В промышленном животноводстве сельскохозяйственные животные подвергаются значительным инфразвуковым облучениям, которые создают электродвигатели, компрессоры, электродоилки. Нет сомнения, что он 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.

*Ультразвук представляет собой механические волны с частотой от 20000 Гц до  $10^9$  Гц.*

Источником ультразвука являются механические (газоструйные излучатели, сирены) и электромеханические генераторы (пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели). Скорости распространения звуковых и ультразвуковых волн примерно одинаковы. Однако длина волны ультразвука значительно меньше, чем звука, что позволяет легко сфокусировать ультразвуковые колебания. Ультразвуковая волна обладает значительно большей интенсивностью, чем звуковая, а жидкость и твердые тела являются для нее хорошими проводниками.

В природе ультразвук встречается как в качестве компонентов многих естественных шумов (в шуме ветра, водопада, дождя, в шуме гальки, перекачиваемой морским прибоем, в звуках, сопровождающих грозовые разряды, и т. д.), так и среди звуков животного мира. Некоторые животные

пользуются ультразвуковыми волнами для обнаружения препятствий, ориентировки в пространстве и общения (киты, дельфины, летучие мыши, грызуны, долгопяты).

На живые организмы ультразвук оказывает возмущающее действие, следствием которого являются приспособительные реакции. Механизм возмущающего действия определяется совокупностью механического, теплового и физико-химического действий и зависит от его частоты и интенсивности. Согласно Акопяну В.Б., ультразвук вызывает в биообъектах следующую цепочку превращений: воздействие - микропотоки в клетке – повышение проницаемости клеточных мембран – изменение состояния внеклеточной среды - нарушение оптимальных условий для ферментативных процессов – подавление ферментативных реакций в клетке – синтез новых ферментов в клетке и т.д. Пороговым для биологического действия ультразвука является  $0,01 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ , при котором не происходит нарушения проницаемости клеточных мембран.

В ветеринарии ультразвук широко применяется в терапии, хирургии и диагностике. Ультразвук, применяемый в терапии и диагностике, имеет низкие интенсивности от 0,05 до 0,1 Вт/м<sup>2</sup>. В этом случае он способствует повышению проницаемости клеточных мембран, активизирует процессы тканевого обмена и т.д. Основное его терапевтическое действие заключается в увеличении проницаемости клеточных мембран, расширении кровеносных сосудов, улучшении обмена веществ.

С помощью ультразвука лечат заболевания суставов, сухожильного аппарата, мышечных атрофий, атонии преджелудков крупного рогатого скота и т.п. Применяют и фонофорез, т.е. введение с помощью ультразвука в ткани через поры кожи некоторых лекарственных веществ (гидрокортизон, тетрациклин и др.). Кроме этого, при помощи ультразвука проводятся операции по удалению опухолей в мозговой ткани без вскрытия черепной коробки. В хирургии используют ультразвук для сварки или распиливания костей, а также для дробления камней в мочевом пузыре.

Особенно большими преимуществами обладает разновидность ультразвукового эхо-метода, основанного на эффекте Доплера, при котором используется отражение ультразвука на границах между тканями с различными акустическими сопротивлениями. Этот метод сходен с рентгенографией, однако более чувствителен и безвреден. Он позволяет дифференцировать мягкие ткани, различающиеся по плотности всего на 0,1%. Его активно применяют в кардиологии, в гинекологии и акушерстве.

## Тема №4. Гидродинамика. Гемодинамика

**Гидродинамика** - раздел физики, в котором изучают вопросы движения жидкостей и их взаимодействие с окружающими твердыми телами.

**Гемодинамика** - раздел биофизики, использующий законы гидродинамики для описания движения крови по сердечно-сосудистой системе.

### 4.1. Идеальная жидкость. Уравнение неразрывности потока. Уравнение Бернулли и следствие из него

**Жидкости** – это вещества, которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами.

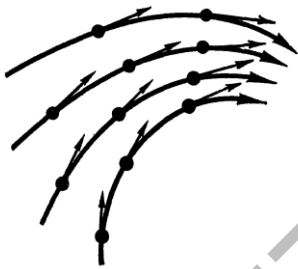
Жидкости отличаются сильным межмолекулярным взаимодействием и, вследствие этого, малой сжимаемостью. К основным свойствам жидкостей относятся текучесть и вязкость.

Воображаемая жидкость, не обладающая ни сжимаемостью, ни вязкостью, называется **идеальной жидкостью**.

#### Основные характеристики идеальной жидкости:

1. **Поток** – совокупность движущихся частиц жидкости.

а



2. **Стационарное течение** – течение, при котором скорости частиц жидкости в каждой точке потока со временем не изменяются.

3. **Линии тока** – воображаемые линии, совпадающие с траекториями частиц. Касательные к линиям тока показывают направление вектора скорости частиц жидкости (рисунок 4.1а).

б



4. **Трубка тока**, или **струя** – часть потока жидкости, со всех сторон ограниченная линиями тока (рисунок 4.1б).

Рисунок 4.1

Рассмотрим продольную трубку тока идеальной жидкости (рисунок 4.1б). Выделим трубку тока настолько узкую, что скорости частиц  $v$  в любом сечении  $S$ , перпендикулярном оси трубки, можно считать одинаковыми по всему сечению.

Тогда объем несжимаемой жидкости, протекающей через любое сечение трубки за время  $\Delta t$ , остается постоянным:

$$V_1 = V_2 \text{ или } S_1 \Delta l_1 = S_2 \Delta l_2$$

Так как  $\Delta l_1 = v_1 \Delta t$  и  $\Delta l_2 = v_2 \Delta t$ , то получим:  $S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$

Сократим на промежуток времени  $\Delta t$ :

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Обобщим на все сечения и получим:

$$S \cdot v = const \quad (4.1)$$

Формула (4.1) - это **уравнение неразрывности потока жидкости**: в любой точке трубки тока при стационарном течении идеальной жидкости произведение скорости течения на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная.

Согласно уравнению (4.1) возникает **следствие**: скорость течения обратно пропорциональна площади поперечного сечения трубки тока (т.е. чем меньше площадь поперечного сечения трубки тока, тем больше скорость течения жидкости в этом сечении, и наоборот).

**Уравнение Бернулли** представляет закон сохранения энергии при движении жидкостей.

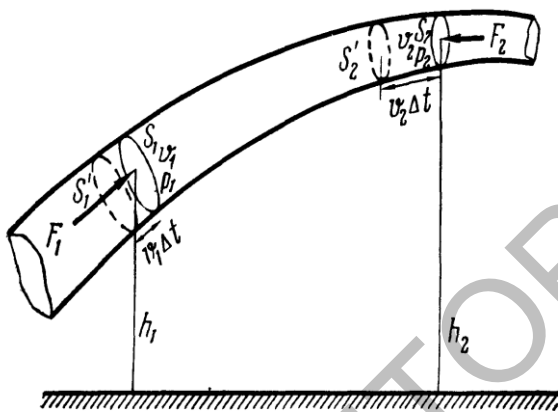


Рисунок 4.2

Предположим, что по наклонной трубе разного сечения течет стационарный поток идеальной жидкости (рисунок 4.2).

Выделим в трубке тока малый объем жидкости  $\Delta V = S_1 \cdot \Delta l_1 = S_2 \cdot \Delta l_2$  с массой  $\Delta m$ , которая при течении перемещается из положения 1 в положение 2.

Перемещение массы  $\Delta m$  жидкости происходит под действием разности внешних сил давления в сечениях  $S_1$  и  $S_2$ .

Работа сил давления равна:

$$\Delta A = F_1 \cdot \Delta l_1 - F_2 \cdot \Delta l_2 = p_1 \cdot S_1 \cdot \Delta l_1 - p_2 \cdot S_2 \cdot \Delta l_2 = p_1 \cdot \Delta V - p_2 \cdot \Delta V, \quad (4.2)$$

где  $p_2$  – давление, противодействующее движению жидкости.

Эта работа затрачивается на изменение кинетической и потенциальной энергии массы  $\Delta m$  при переходе из положения 1 в положение 2.

С учетом формулы (4.2):

$$p_1 \cdot \Delta V - p_2 \cdot \Delta V = \left( \Delta m \cdot g \cdot h_2 + \frac{\Delta m \cdot v_2^2}{2} \right) - \left( \Delta m \cdot g \cdot h_1 + \frac{\Delta m \cdot v_1^2}{2} \right)$$



Перегруппируем и поделим на  $\Delta V$ . Затем учтем, что  $\Delta m/\Delta V = \rho$  - плотность жидкости и тогда:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} = const$$

Обобщим и получим **уравнение Бернулли**:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = const, \quad (4.3)$$

где  $p$  - статическое давление, его можно измерить манометром, неподвижным относительно жидкости;

$\rho \cdot g \cdot h$  - гидростатическое (весовое) давление;

$\frac{\rho \cdot v^2}{2}$  - динамическое давление, обусловленное движением жидкости.

**Уравнение Бернулли:** в любой точке трубки тока при стационарном течении идеальной жидкости сумма статического, гидростатического и динамического давлений есть величина постоянная.

Для горизонтальной трубки тока  $h = const$ , значит, гидростатическое давление остается постоянным и возникает **следствие из уравнения Бернулли**:

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = const \quad (4.4)$$

**Следствие из уравнения Бернулли:** при стационарном течении идеальной жидкости по горизонтальной трубке сумма статического и динамического давлений есть величина постоянная.

Следствие означает, что статическое давление идеальной жидкости при течении по горизонтальной трубе возрастает там, где скорость ее уменьшается, и наоборот. Значит, сечение трубки  $S_2$  можно сделать столь узким, что вследствие малого статического давления (ниже атмосферного) в это сечение будет засасываться воздух или жидкость (*всасывающее действие струи*). Это используется в водоструйных насосах, медицинских ингаляторах, в пульверизаторах, доильных аппаратах, карбюраторах в двигателях внутреннего сгорания и других приборах.

## 4.2. Реальная жидкость. Течение вязкой жидкости

**Реальная жидкость** сжимаема и обладает вязкостью (внутренним трением).

Вязкость обусловлена силами притяжения между молекулами жидкости.

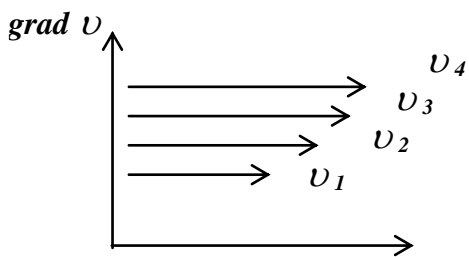


Рисунок 4.3

В результате чего при течении жидкость начинает делиться на слои, движущиеся параллельно друг другу с различными скоростями (рисунок 4.3).

При открытом течении слой, «прилипший» ко дну русла, неподвижен. Скорость слоев 1, 2, 3, 4 возрастает, принимая максимальное значение в слое, граничившем с воздухом ( $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$ ).

Отношение изменения скорости  $\Delta v$  на расстояние  $\Delta x$  в направлении, перпендикулярном скорости, называется **градиентом скорости**:

$$\Delta v / \Delta x = \text{grad } v$$

**Градиент** (лат. *gradiens* – шагающий) – пространственная быстрота изменения какой-либо физической величины.

Ньютон доказал, что сила внутреннего трения  $F$ , возникающая между двумя параллельными слоями жидкости, прямо пропорциональна площади поверхности соприкасающихся слоев  $\Delta S$  и градиенту скорости  $\Delta v / \Delta x$  между ними.

**Формула Ньютона:**

$$F = -\eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot \Delta S, \quad (4.5)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости.

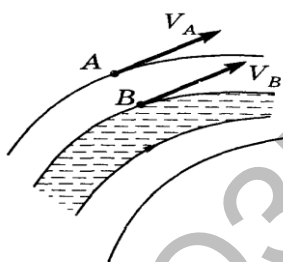


Рисунок 4.4

Знак «минус» указывает на то, что сила внутреннего трения направлена противоположно градиенту скорости.

В зависимости от скорости течения жидкости различают ламинарное и турбулентное течения.

При небольших скоростях возникает **ламинарное течение**, при котором слои жидкости движутся относительно друг друга, не перемешиваясь (рисунок 4.4).

При движении жидкости по круглой трубе у стенок скорость жидкости минимальна.

Затем начинает увеличиваться и посередине становится максимальной. Градиент скорости направлен вдоль радиуса трубы к ее центру (рисунок 4.5).

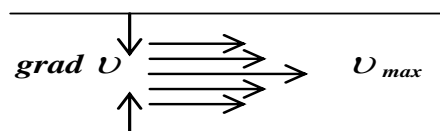


Рисунок 4.5

Французские физики Гаген и Пуазейль в 1941 году опытным путем установили, что средняя скорость ламинарного течения жидкости по круглой трубе постоянного сечения прямо пропорциональна градиенту давления

$\Delta p / \Delta x$ , квадрату радиуса  $R^2$  трубы и обратно пропорциональна коэффициенту вязкости  $\eta$  жидкости:

$$v_{cp} = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{R^2}{8 \cdot \eta} \quad \dots \quad (4.6)$$

Формула (4.6) - это **формула Пуазейля для средней скорости течения жидкости**.

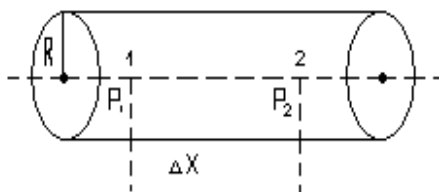


Рисунок 4.6

Пусть жидкость течет по круглой горизонтальной трубе с внутренним радиусом  $R$  (рисунок 4.6). Рассмотрим небольшой отрезок трубы длиной  $\Delta x$  в отдалении от ее концов. Давление в начале отрезка обозначим  $p_1$ , а в конце его –  $p_2$ . Жидкость течет под действием перепада давлений  $p_1 - p_2 = \Delta p$ .

Определим объем жидкости, протекающей по трубе сечением  $S$  при ламинарном течении жидкости за время  $t$ :

$$V = S \cdot l,$$

где  $l$  - расстояние, проходимое жидкостью за время  $t$ .

Расстояние определим по формуле:  $l = v_{cp} \cdot t$

Тогда объем протекающей жидкости:  $V = S \cdot v_{cp} \cdot t$

Подставив формулу (4.6) для средней скорости, получим:

$$V = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{R^2}{8 \cdot \eta} \cdot S \cdot t$$

Т.к. поперечное сечение трубы имеет форму круга, а площадь круга:  $S = \pi \cdot R^2$ , тогда объем протекающей жидкости:

$$V = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot \eta} \cdot t \quad (4.7)$$

Выражение (4.7) - **формула Пуазейля для объема протекающей жидкости**: объем жидкости прямо пропорционален градиенту давления, четвертой степени радиуса трубы, времени протекания и обратно пропорционален коэффициенту вязкости.

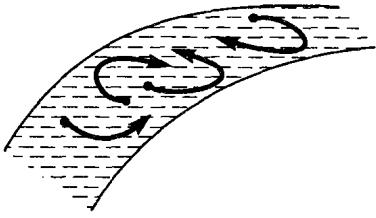


Рисунок 4.7

При увеличении скорости движения жидкости ламинарное течение переходит в **турбулентное**, при котором слои жидкости перемешиваются, возникают завихрения, шум (рисунок 4.7).

Переход происходит при достижении некоторой **критической скорости**:

$$v_{кр.} = \frac{Re \cdot \eta}{\rho \cdot R}, \quad (4.8)$$

где  $Re$  - число Рейнольдса, зависящее от коэффициента вязкости  $\eta$  и плотности жидкости  $\rho$  (для крови  $Re=970\pm 80$ ; для воды  $Re=2000-2400$ );  $R$  - радиус трубы;  $\eta$  - коэффициент вязкости.

Поток жидкости через трубу будет ламинарным, если  $Re < 2000$ , если  $Re > 3000$  – поток турбулентный. Режим с  $Re$  между 2000 и 3000 является промежуточным, при котором течение нестабильно и может изменяться случайным образом между ламинарным и турбулентным.

### 4.3. Коэффициент вязкости и методы его определения

**Коэффициент вязкости** численно равен силе внутреннего трения, возникающей при ламинарном течении между двумя слоями жидкости, соприкасающимися на площади, равной единице, и при градиенте скорости между ними, равном минус единице:

$$\eta = \frac{F_{тр.}}{\frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S} \quad (4.9)$$

Единицей измерения коэффициента вязкости в СИ служит **паскаль на секунду**:

$$[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$$

У большинства жидкостей (вода, низкомолекулярные органические соединения, истинные растворы, расплавленные металлы и соли) коэффициент вязкости зависит только от природы и температуры (с повышением температуры  $\eta$  понижается). Такие жидкости называют **ньютоновскими**.

У некоторых жидкостей, преимущественно высокомолекулярных (растворы полимеров) или представляющих дисперсионные системы (суспензии, эмульсии), коэффициент вязкости зависит также от режима течения (давления и градиента скорости). При их увеличении вязкость жидкости уменьшается вследствие нарушения внутренней структуры потока жидкости. Такие жидкости называют **структурно вязкими**, или **неньюто-**

**новскими.** Их вязкость характеризуют так называемым условным коэффициентом вязкости, который относится к определенным условиям течения жидкости (давление, скорость).

*Кровь представляет собой суспензию форменных элементов в белковом растворе – плазме. Поэтому она должна быть отнесена к неньютоновским жидкостям. Но так как вязкость крови не очень велика, ее коэффициент вязкости является постоянной величиной.*

Определение коэффициента вязкости биологических жидкостей имеет большое диагностическое значение. Так, в норме у здорового человека коэффициент вязкости крови  $\eta = 4 \div 6$  мПа·с, при анемии (когда в крови наблюдается недостаток эритроцитов) -  $\eta = 2 \div 3$  мПа·с, при полицитемии (когда в крови наблюдается избыток форменных элементов крови) -  $\eta = 15 \div 20$  мПа·с.

Совокупность методов измерения вязкости называют **вискозиметрией**, а приборы, используемые для этих целей – **вискозиметрами**.

Рассмотрим несколько методов определения коэффициента вязкости.

### 1. Метод капиллярного вискозиметра

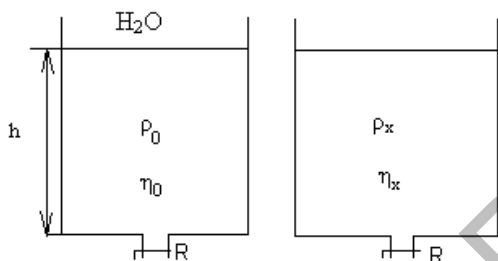


Рисунок 4.8

Прибор состоит из цилиндрического сосуда с капилляром на конце (игла) и крана (рисунок 4.8). До определенного уровня наливают стандартную жидкость (дистиллированную воду) и, открыв кран, определяют время ее вытекания  $t_0$ .

Аналогичные измерения проводят с исследуемой жидкостью.

Объемы стандартной и исследуемой жидкостей определяют по формуле Пуазейля (4.7), и так как они одинаковы  $V_0 = V_x$  то:

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta_0} \cdot t_0 = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta_x} \cdot t_x$$

Учтем, что разность давлений – это гидростатическое давление столба жидкости:  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$ , получим:

$$\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{\eta_0} \cdot t_0 = \frac{\rho_x \cdot g \cdot h}{\eta_x} \cdot t_x$$

Сокращаем общие множители:

$$\frac{\rho_0}{\eta_0} \cdot t_0 = \frac{\rho_x}{\eta_x} \cdot t_x$$

И выражаем коэффициент вязкости исследуемой жидкости:

$$\eta_x = \eta_0 \cdot \frac{\rho_x \cdot t_x}{\rho_0 \cdot t_0} \quad (4.10)$$

Недостатком метода является то, что заранее необходимо определять еще и плотности жидкостей, что увеличивает погрешность измерения.

**2. Вискозиметр Гесса** - прибор для определения относительной вязкости крови.

В этом методе определяют расстояния, которые проходят по трубкам вода и кровь за одно и то же время. Применение формулы Пуазейля приводит к следующей расчетной формуле, определяющей вязкость крови:

$$\eta_x = \eta_0 \cdot \frac{L_0}{L_x}, \quad (4.11)$$

где  $L_0$  и  $L_x$  – расстояния, на которые перемещаются вода и кровь.

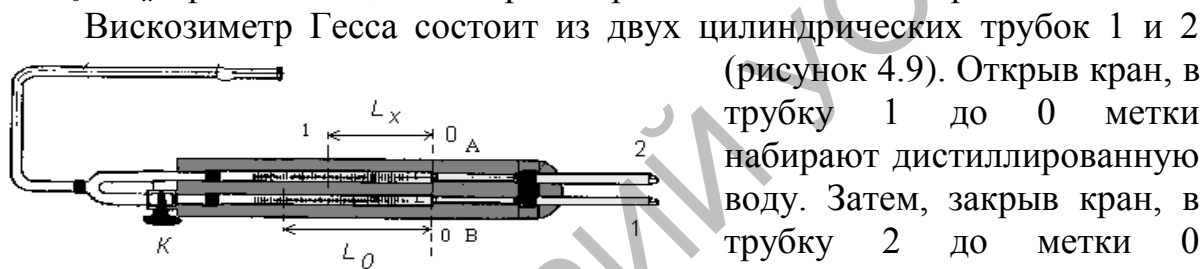


Рисунок 4.9

Вискозиметр Гесса состоит из двух цилиндрических трубок 1 и 2 (рисунок 4.9). Открыв кран, в трубку 1 до 0 метки набирают дистиллированную воду. Затем, закрыв кран, в трубку 2 до метки 0 набирают кровь. После этого открывают кран и втягивают воздух из двух капилляров так, чтобы кровь дошла до метки 1, при этом вода, как менее вязкая жидкость, дойдет до более высокой метки, которая и укажет относительную вязкость крови.

Относительная вязкость крови в норме составляет 4,2 - 6.

Вязкость сыворотки крови в норме – 1,64 - 1,69 , а при патологии – 1,5 - 2,0.

### 3. Метод Стокса

Для более вязких жидкостей используют вискозиметры, основанные на измерениях скорости падения в жидкости маленьких шариков.

Стокс эмпирически установил, что сила сопротивления, действующая на тело шарообразной формы, при движении его с небольшой скоростью в вязкой жидкости пропорциональна радиусу шарика  $R$ , скорости  $v$  и коэффициенту вязкости  $\eta$  жидкости (**закон Стокса**):

$$F_C = 6\pi \cdot R \cdot \eta \cdot v \quad (4.12)$$

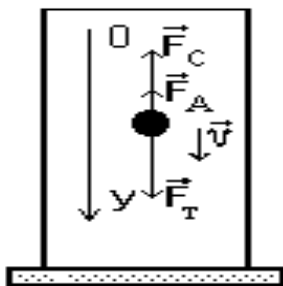


Рисунок 4.10

Пусть в жидкости плотностью  $\rho_{ж}$  падает шарик радиусом  $R$  и плотностью  $\rho_T$  (рисунок 4.10).

Объем шара определяют по формуле:

$$V = 4/3\pi R^3$$

На шарик действуют три силы:

1 - сила тяжести, направленная вертикально вниз:

$$F_T = m_T \cdot g = \rho_T \cdot V \cdot g = 4/3\pi R^3 \cdot \rho_T \cdot g$$

2 - выталкивающая сила или сила Архимеда, направленная вертикально вверх:

$$F_A = \rho_{ж} \cdot g \cdot V = 4/3\pi R^3 \cdot \rho_{ж} \cdot g$$

3 - сила Стокса, направленная противоположно движению шарика:

$$F_C = 6\pi \cdot R \cdot \eta \cdot v$$

Под действием этих трех сил шарик в соответствии со вторым законом Ньютона приобретает ускорение  $a$ :

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_C$$

По мере падения шарика скорость его возрастает, что, как следует из формулы (4.12) приводит к возрастанию силы Стокса. Через некоторое время шарик достигнет такой скорости, при которой его ускорение станет равным нулю, и движение шарика станет равномерным.

Выбрав ось отсчета, найдем проекции сил на ось  $OY$  и запишем второй закон Ньютона в алгебраической форме:

$$F_T - F_A - F_C = 0$$

Подставим формулы сил, действующих на тело:

$$4/3\pi R^3 \cdot \rho_T \cdot g - 4/3\pi R^3 \cdot \rho_{ж} \cdot g - 6\pi R \cdot \eta \cdot v = 0$$

И выразим коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_T - \rho_{ж})}{v} \cdot R^2 \cdot g \quad (4.13)$$

В лабораторно-клинической практике методом Стокса определяют скорость оседания эритроцитов СОЭ. В норме у мужчин  $v = 9 \div 10$  мм / ч, а

у женщин –  $v = 14 \div 15$  мм/ч. Разница объясняется тем, что у женщин плотность и вязкость крови меньше, чем у мужчин, за счет другого гормонального состава крови. Кроме этого, у одного и того же организма в разных физиологических состояниях СОЭ может отличаться.

У сельскохозяйственных животных СОЭ также различается, например, у лошади она 64 мм/ч, у крупного рогатого скота – 0,58 мм/ч, у овцы – 0,8 мм/ч, а у свиньи - 30 мм/ч.

Весьма важно, что на величину СОЭ влияет вязкость плазмы крови. При наличии в организме патологии или воспалительного процесса за счет изменения состава плазмы эритроциты склеиваются в «монетные столбики», и в крови будут осаждаться не сами эритроциты, а их скопления – конгломераты частиц. В результате эффективный радиус оседающих частиц увеличивается и СОЭ возрастает.

Определение СОЭ служит важным диагностическим показателем.

#### **4.4. Движение крови по сердечно-сосудистой системе. Работа сердца. Измерение артериального давления крови**

**Кровообращение** - это один из наиболее важных процессов, происходящих в живых организмах.

**Кровь** – непрозрачная вязкая суспензия, состоящая из жидкой части (плазмы) и взвешенных в ней клеток, называемых форменными элементами, – эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов.

Кровь выполняет в организме человека и животных важнейшие физиологические функции. В легких кровь обогащается кислородом, который затем доставляется тканям и органам. В пищеварительном тракте она получает растворенные составные части продуктов питания и разносит их по всему организму. Из клеток в кровь поступают некоторые продукты обмена веществ, которые она переносит к органам выделения: почкам, легким и коже. Кроме **транспортной функции**, кровь выполняет и другие функции: **питательную**, доставляя тканям питательные вещества (глюкозу, аминокислоты, жиры, витамины, минеральные вещества, полипептиды и воду); **дыхательную**, доставляя клеткам кислород; **выделительную**, унося из тканей продукты обмена к органам выделения (аммиак, мочевину, углекислый газ и др.); **регуляторную**, перенося гормоны к органам и тканям, тем самым обеспечивая гуморальную регуляцию различных функций; **защитную**, обеспечивая иммунитет; **поддерживает водный и солевой баланс** в организме; обладая большой теплопроводностью, **принимает участие в терморегуляции** посредством выравнивания температуры внутренних органов и поверхности тела, что способствует поддержанию постоянной температуры тела у теплокровных животных.

Непрерывное движение крови в организме обеспечивается деятельностью системы органов кровообращения (сердце, сосуды, капилляры).

**Особенностью сердечно-сосудистой системы** является то, что она представляет замкнутую, многократно разветвленную систему трубок с



эластичными стенками, по которой движение крови создается работой сердца.

**Сердце** является основным источником энергии, обеспечивающим движение крови в сосудистой системе. Оно переводит химическую энергию, заключенную в молекулах АТФ, образующихся в процессе гликолиза и окислительного фосфорилирования в сердечной мышце, в механическую работу. Таким образом, сердце представляет собой работающий в импульсном режиме хемозелектромеханический насос, у которого **рабочая фаза – сокращение мышцы (систола)** – чередуется с фазой **расслабления – отдыха мышцы (диастола)**. Длительность систолы приблизительно вдвое меньше, чем диастолы, что позволяет сердечной мышце 2/3 времени отдыхать.

Сердце у млекопитающих и птиц состоит из четырех обособленных камер – двух предсердий и двух желудочков. Оно разделено на две половины – правую и левую, сообщающиеся между собой только через кровеносные сосуды. Сокращения сердечной мышцы создают разность давлений в артериальной и венозной системах, благодаря чему и возникает движение крови. Частота сердечных сокращений обратно пропорциональна массе животного: чем меньше масса, тем больше теплопотери в окружающую среду, и, следовательно, тем больше обмен веществ и снабжение организма кислородом.

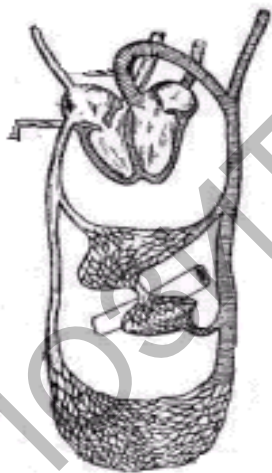


Рисунок 4.11

Рассмотрим схематические явления, происходящие в большом круге кровообращения (рисунок 4.11). При каждом сокращении левого желудочка сердца в аорту, уже заполненную кровью, под соответствующим давлением выбрасывают одинаковое количество крови, называемое **ударным объемом**, который составляет у человека – 60-70 мл, у лошади – 850 мл, у крупного рогатого скота – 580 мл, у овцы – 55 мл, у собаки – 14 мл. Затем клапаны аорты закрываются. Поступивший в аорту дополнительный объем крови повышает давление в ней и вызывает растяжение. Это давление называют **систолическим**. Волна повышенного давления крови называется **пульсовой волной**. Скорость ее зависит от упругости и плотности сосудистых стенок и имеет порядок 6-8 м/с. Затем (уже в

период диастолы) стенки сосудов последовательно сокращаются до исходного положения и проталкивают поступившую в аорту кровь в последующие звенья сосудистой системы. В результате ток крови принимает непрерывный характер со скоростью в крупных сосудах 0,3 - 0,5 м/с.

На рисунке 4.12 приведены графики среднего давления и скорости



Рисунок 4.12

кровотока в различных отделах кровеносной системы человека. Скорость движения крови в разных участках зависит от общего просвета кровеносных сосудов. Суммарный просвет одновременно функционирующих капилляров в 1000 раз превышает просвет аорты, поэтому кровь движется в капиллярах со скоростью 0,5 мм/с. В се-

ти венозных сосудов, площадь сечения которых в среднем в два раза больше площади сечения соответствующих артерий, поэтому скорость кровотока в венах - 20 см/с.

Давление крови максимально в аорте и крупных артериях, снижается в мелких артериях и артериолах, капиллярах и венах и падает на несколько миллиметров ртутного столба ниже атмосферного в полых венах. Кровь в этих условиях движется под влиянием присасывающего действия грудной клетки при вдохе.

Вызывая движение крови в сосудистой системе, сердце совершает работу, которая превращается в энергию потока крови и расходуется на преодоление вязкости в сосудистой системе.

**Работу сердца левого желудочка** в большом круге кровообращения можно вычислить по формуле:

$$A_{л.ж} = p \cdot V_{уд} + \frac{m \cdot v^2}{2} = V_{уд} \cdot \left( p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \right), \quad (4.14)$$

где  $p$  – разность между систолическим и диастолическим давлением;

$v$  – скорость крови в момент выброса из желудочка;

$V_{уд}$  – ударный объем крови.

В малом круге кровообращения кровь встречает значительно меньшее сопротивление и поэтому начальное давление в правом желудочке в пять раз меньше, чем в левом. Начальные скорости крови в большом и малом кругах кровообращения практически одинаковы. С учетом этого работа сердца состоит из работы по преодолению сопротивления в большом и малом кругах кровообращения, т.е. суммы работы левого и правого желудочков:

$$A_c = A_{л.ж} + A_{пр.ж}$$

Т.к.  $A_{пр.ж.} = 0,2 A_{л.ж.}$ , то полная работа сердца  $A_c = 1,2 A_{л.ж.}$

Таким образом, получаем **формулу работы сердца:**

$$A_c = 1,2 \cdot V_{уд} \cdot \left( p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \right) \quad (4.15)$$

За одно сокращение сердце человека совершает работу  $A \approx 1$  Дж. Считая, что в среднем за минуту сердечная мышца совершает 60 сокращений, получим, что за одни сутки работа сердца  $A > 86400$  Дж. При физической нагрузке работа сердца увеличивается более чем в 5 раз.

*Толчкообразное ритмическое колебание стенок кровеносных сосудов, возникающее вследствие выброса в артериальную систему крови при сокращении сердца, называют **пульсом**.* Пульс отражает работу сердца и кровеносных сосудов. Исследование пульса является одним из важнейших методов медицинской и ветеринарной диагностики.

**Частота пульса** (количество пульсовых ударов за 1 минуту) у здоровых животных соответствует количеству сердечных сокращений. Так, у крупного рогатого скота в норме – 50-80, у мелкого рогатого скота – 70-80, у лошади – 24-42, у свиньи – 60-90, у собаки – 70-120, у кошки – 110-130, у кроликов, кур, уток, гусей – 120-200.

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 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 при измерении артериального давления.

Существует два способа измерения давления: прямой и манжетный.

**Прямой метод** основан на введении катетера непосредственно в кровеносный сосуд или полость сердца. Катетер заполняется изотоническим раствором (0,85% KCl), который и передает давление крови с вводного конца на внешний измерительный манометр. Прямой метод – практически единственный метод измерения давления в полости сердца и центральных сосудов. Его недостаток – измерение связано с потерей крови и болевыми ощущениями.

**Манжетный метод** - более совершенный бескровный метод измерения давления крови был предложен в 1896 г. итальянским врачом Рива-Роччи и усовершенствован в 1905 г. русским врачом Н. С. Коротковым.

Метод основан на прослушивании шумов, создаваемых пульсовыми волнами.

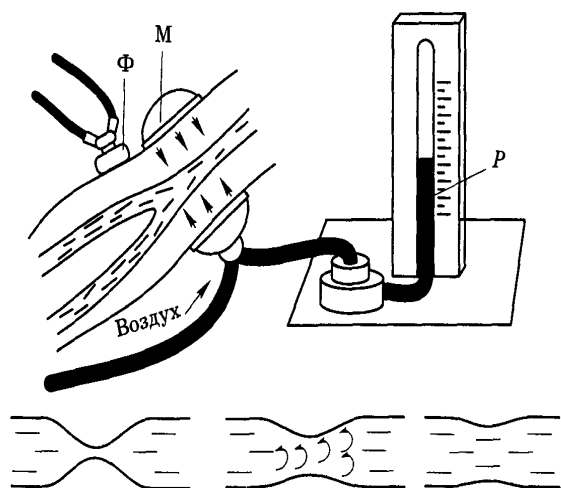


Рисунок 4.13

При измерении давления у человека (рисунок 4.13) между плечом и локтем накладывают манжету (М) и накачивают в нее воздух до тех пор, пока в плечевой артерии не прекращается ток крови, и не исчезает пульс. Затем воздух из манжеты с помощью вентиля понемногу выпускают, и давление на артерию понемногу ослабевает.

Когда давление на артерию станет равным систолическому, кровь начинает проталкиваться через сдавленную артерию, и в

ней создается турбулентный поток, сопровождающийся шумом (тоны Короткова). Эти шумы хорошо прослушиваются через фонендоскоп (Ф), капсула которого располагается ниже манжеты в локтевом изгибе. По манометру регистрируют соответствующее этому моменту систолическое давление.

При дальнейшем снижении давления в манжете просвет в артерии постепенно восстанавливается до нормального. Течение крови становится ламинарным, и шумы прекращаются. Показание манометра в момент исчезновения шумов соответствует диастолическому давлению.

В норме у здорового человека средних лет систолическое давление –  $p_c \approx 120$  мм рт. ст., а диастолическое давление –  $p_d \approx 80$  мм рт. ст.

У животных величина артериального давления крови зависит от вида, возраста, породы, уровня продуктивности и физиологического состояния животного.

Например, величина артериального давления у животных в норме (систолическое/диастолическое, мм рт. ст.): лошадь – 110-120/35-50, крупный рогатый скот – 110-140/30-50, мелкий рогатый скот – 100-120/50-65, свиньи – 135-155/45-55, собаки – 120-140/30-40.

Артериальное давление изменяется при самых разных болезнях. Патологическое понижение артериального давления называют *гипотензией*, а патологическое повышение – *гипертензией*.

## II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Молекулярной физикой* называется раздел физики, изучающий зависимость строения и физических свойств тел от характера движения и взаимодействия между частицами, из которых состоят тела.

*Термодинамика* - раздел физики, изучающий процессы перехода теплоты в другие виды энергии.

### Тема №5. Основы молекулярно-кинетической теории

#### 5.1. Основные положения МКТ. Понятие об идеальном газе, экспериментальные газовые законы, уравнение состояния идеального газа

Молекулярная физика основывается на молекулярно-кинетической теории строения вещества, в основе которой лежат следующие основные положения:

**1. Все тела состоят из мельчайших частиц – атомов или молекул.**

*Молекула* - наименьшая часть вещества, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных между собой химическими связями.

*Атом* - наименьшая частица химического элемента, обладающая его свойствами.

В случае одноатомных молекул, например молекул инертных газов, понятия молекула и атом совпадают.

**2. Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.**

Хаотическое движение еще называют тепловым, так как интенсивность этого движения зависит от температуры: чем выше температура, тем интенсивнее движение молекул. В газообразных веществах движение молекул преимущественно поступательное и вращательное; в твердых веществах молекулы колеблются около равновесного положения, в жидких веществах движение молекул колебательное и периодически поступательное.

**3. На небольших расстояниях между молекулами (атомами) действуют как силы притяжения, так и силы отталкивания; природа этих сил электромагнитная.**

Силы взаимодействия зависят от расстояния между молекулами и действуют только на расстояниях, соизмеримых с размерами молекул. При этом при взаимном удалении частиц проявляется действие сил притяжения, а при сближении частиц – сил отталкивания. На расстояниях, превышающих размеры молекул в несколько раз, действие сил практически равно нулю.

Соотношение между силами притяжения и отталкивания, от которого зависит равновесное расстояние между молекулами и характер тепलो-

го движения, а также внешние условия (давление и температура), обуславливают твердое, жидкое или газообразное состояние вещества.

Совокупность рассматриваемых тел твердых, жидких или газообразных называют **системой тел** или **системой**. Простейшей моделью газа является **идеальный газ**.

**Идеальный газ** – это теоретическая модель газа, молекулы которого представляют собой материальные точки, не взаимодействующие друг с другом.

Состояние идеального газа характеризуется совокупностью физических величин - **параметров состояния**.

Основными параметрами являются:

- **объем  $V$** , занимаемый некоторой массой вещества;
- **давление  $p$**  - физическая величина, равная отношению силы, действующей на единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно:

$$p = \frac{F}{S};$$

- **термодинамическая температура  $T$**  - температура, измеренная по шкале Кельвина. Она связана с температурой, измеренной по шкале Цельсия ( $t^{\circ}\text{C}$ ) формулой:

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273$$

Параметры состояния связаны между собой функциональной зависимостью:

$$F(p, V, T) = 0 \quad (5.1)$$

Выражение(5.1) называется **уравнением состояния**.

**Равновесным состоянием** системы называется такое, при котором все параметры системы имеют определенные значения, остающиеся постоянными при неизменных внешних условиях.

Если какой-то параметр системы изменяется, то в этом случае состояние системы называется **неравновесным**.

Если взять определенную массу газа  $m$ , то при постоянных  $V$ ,  $p$  и  $T$  газ будет находиться в равновесном состоянии. Когда происходит изменение этих параметров, то в газе протекает тот или иной процесс. В результате газ переходит в новое состояние, а его параметры принимают новые значения.

Процессы, при которых масса газа и один из параметров остаются постоянными, называются **изопроцессами**.

Так как имеется три параметра газа, существует три различных изопроцесса.

**1. Изохорный** - это процесс в газе, который происходит при постоянной массе и неизменном объеме ( $m = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$ ).

Изохорный процесс подчиняется **закону Шарля**: при постоянном объеме и неизменных значениях массы идеального газа и его молярной массы отношение давления газа к его абсолютной температуре остается постоянным.

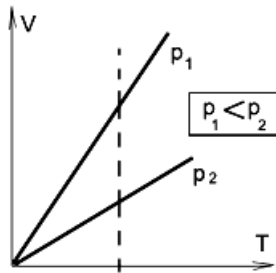


Рисунок 5.1

$$\frac{P}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (5.2)$$

График изохорного процесса называется **изохорой** и изображен на рисунке 5.1.

**2. Изобарный** - это процесс в газе, который происходит при постоянной массе газа и неизменном давлении ( $m=const, p=const$ ).

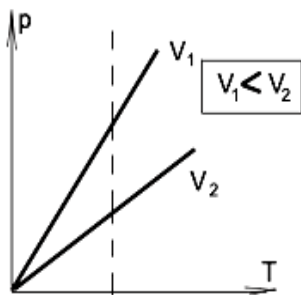


Рисунок 5.2

Изобарный процесс подчиняется **закону Гей-Люссака**: при постоянном давлении и неизменных значениях массы идеального газа и его молярной массы, отношение объема газа к его абсолютной температуре остается постоянным:

$$\frac{V}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (5.3)$$

График изобарного процесса называется **изобарой** и изображен на рисунке 5.2.

**3. Изотермический** - это процесс в газе, который происходит при постоянной массе газа и неизменной температуре ( $m=const, T=const$ ).

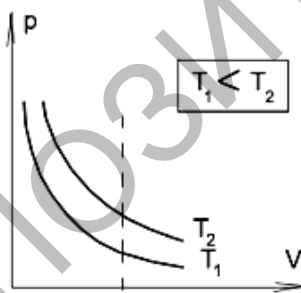


Рисунок 5.3

Изотермический процесс описывается **законом Бойля-Мариотта**: при постоянной температуре и неизменных значениях массы идеального газа и его молярной массы, произведение объема газа на его давление остается величиной постоянной:

$$p \cdot V = const \quad \text{или} \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (5.4)$$

График изотермического процесса называется **изотермой** и изображен на рисунке 5.3.

Обобщая газовые законы, Клапейрон установил, что при изменении состояния данной массы газа произведение его давления  $p$  на объем  $V$ , деленное на абсолютную температуру  $T$ , остается величиной постоянной:

$$\frac{p \cdot V}{T} = const \quad (5.5)$$

Для одного моля газа соотношение (5.5) будет иметь одинаковое численное значение для всех газов:

$$\frac{p \cdot V}{T} = R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad (5.6)$$

Величина  $R$  называется *универсальной газовой постоянной*.

В результате получим *уравнение Менделеева–Клапейрона*, или *уравнение состояния для одного моля идеального газа*:

$$p \cdot V_M = R \cdot T \quad (5.7)$$

произвольной массы газа *уравнение Менделеева–Клапейрона* имеет следующий вид:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (5.8)$$

Для идеального газа справедливы законы:

**1. Закон Авогадро:** *один моль любого газа при одинаковых температуре и давлении занимает одинаковый объем. При нормальных условиях ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,03 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ) этот объем равен  $V_M = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ .*

*Один моль любого газа содержит одинаковое число молекул (атомов). Это число называется **числом Авогадро**:*

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

**2. Закон Дальтона:** *давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов:*

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

где  $p_n$  - *парциальные давления* - давления, которые бы оказывали компоненты смеси, если бы каждый из них занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.

## 5.2. Основное уравнение МКТ и следствие из него. Число степеней свободы. Внутренняя энергия идеального газа

Уравнение состояния идеального газа дает соотношение между его макропараметрами: давлением, объемом и температурой. Основное урав-



нение МКТ устанавливает связь между макропараметрами газа и усредненными микропараметрами составляющих газ молекул.

Если газ находится в закрытом сосуде, то молекулы в процессе теплового движения ударяются о стенки сосуда и этим создают давление газа. Чем больше кинетическая энергия поступательного движения каждой молекулы, тем больше сила, возникающая при ее ударе о стенку. Кроме того, чем больше молекул в единице объема  $n_0$ , тем чаще они ударяются о стенку. Поэтому *давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии  $\bar{E}_{кин}$  поступательного движения молекул газа и их числу в единице объема  $n_0$ :*

$$p = \frac{2}{3} \cdot n_0 \cdot \bar{E}_{кин} \quad (5.9)$$

Эта формула имеет очень большое значение и называется **основным уравнением молекулярно-кинетической теории**.

Рассмотрим некоторые следствия из этого уравнения.

Умножим обе части уравнения (5.9) на объем одного моля  $V_M$ , получим:  $p \cdot V_M = \frac{2}{3} \cdot n_0 \cdot \bar{E}_{кин} \cdot V_M$ . Но из формулы (5.7)  $p \cdot V_M = R \cdot T$ , а

$n_0 \cdot V_M = N_A$ , значит  $R \cdot T = \frac{2}{3} \cdot \bar{E}_{кин} \cdot N_A$ . Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна  $\bar{E}_{кин} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T$ . Поскольку

$R$  и  $N_A$  - постоянные, то и  $k = \frac{R}{N_A}$ , является величиной неизменной и называется **постоянной Больцмана**:

$R$  и  $N_A$  - постоянные, то и  $k = \frac{R}{N_A}$ , является величиной неизменной и называется **постоянной Больцмана**:

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8,31(\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К})}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Учитывая постоянную Больцмана, получим:

$$\bar{E}_{кин} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (5.10)$$

**Вывод:** средняя кинетическая энергия одной молекулы идеального газа прямо пропорциональна термодинамической температуре и не зависит от природы газа.

Подставим значение средней кинетической энергии (5.10) в основное уравнение МКТ (5.9) и получим формулу:

$$p = n_0 \cdot k \cdot T \quad (5.11)$$

**Вывод:** давление газа не зависит от его природы, а определяется только его концентрацией  $n_0$  и температурой газа  $T$ .

Выражение для средней энергии молекулы газа (5.10) учитывает только ее среднюю энергию поступательного движения. Но наряду с поступательным движением молекула может совершать вращательное движение. Этот вид движения также связан с некоторым запасом энергии, определить который можно, пользуясь законом о распределении энергии по степеням свободы.

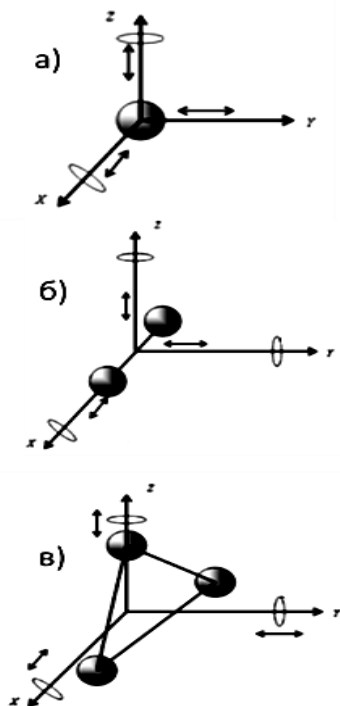


Рисунок 5.4

**Число степеней свободы  $i$**  называется число независимых координат, необходимых для полного описания положения системы (молекулы) в пространстве.

Каждой молекуле (атому) газа можно приписать определенное число степеней свободы, рассматривая их как материальные точки. Положение молекулы в пространстве описывается шестью независимыми координатами: тремя поступательными ( $x, y, z$ ) и тремя вращательными ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Если свобода ограничена, то число степеней свободы меньше шести.

Так, *одноатомная* молекула газа имеет только три степени свободы поступательного движения (рисунок 5.4 а), то

$$i = i_{\text{пост}} = 3$$

*Двухатомная* молекула при жесткой связи имеет пять степеней свободы (рисунок 5.4 б):

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} = 3 + 2 = 5$$

*Трехатомная* молекула имеет шесть степеней свободы (рисунок 5.4 в):

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} = 3 + 3 = 6$$

По закону распределения энергии, на каждую степень свободы приходится одинаковая кинетическая энергия, равная  $kT/2$ .

Тогда полная кинетическая энергия молекулы, имеющая  $i$  степеней свободы, будет равна:

$$\bar{E}_{\text{кин}} = \frac{i}{2} \cdot k \cdot T \quad (5.12)$$

Внутренняя энергия газа  $U$  равна сумме кинетической энергии поступательного и вращательного движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Так как молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, то **внутренняя энергия идеального газа представляет собой только сумму значений кинетической энергии движения всех его молекул.**

Для одного моля идеального газа внутренняя энергия будет равна:

$$U = N_A \cdot \bar{E}_{кин} = N_A \cdot \frac{i}{2} k \cdot T = \frac{i}{2} \cdot R \cdot T \quad (5.13)$$

Внутренняя энергия произвольной массы газа  $m$  будет вычисляться по формуле:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (5.14)$$

Таким образом, *внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна массе газа и его термодинамической температуре.*

### **5.3. Явление переноса. Диффузия, теплопроводность, внутреннее трение. Явление переноса в биологических объектах**

В результате хаотического движения молекул и соударений между ними происходят непрерывные изменения их скоростей и энергий в веществе. Если в веществе существует пространственная неоднородность плотности, температуры или скорости упорядоченного движения отдельных слоев вещества, то на беспорядочное тепловое движение молекул вещества накладывается упорядоченное движение, которое ведет к выравниванию этих неоднородностей. Эти явления называются *явлениями переноса*.

Таким образом, **явления переноса** – это группа явлений, обусловленных хаотическим тепловым движением молекул и приводящих к направленному переносу энергии (теплопроводность), импульса (внутреннее трение) или массы (диффузия).

Во всех трех явлениях имеется много общего, а именно в среде происходит направленный перенос какой-либо физической величины (энергии, импульс, массы) из одной части вещества в другую до тех пор, пока данная величина не распределится равномерно по всему объему.

Если в некотором объеме распределена примесь другого газа (или увеличена плотность данного газа), то хаотическое движение молекул будет способствовать выравниванию концентрации молекул. Процесс выравнивания концентрации молекул газа называется **диффузией**.

**Диффузия** - это явление самопроизвольного переноса молекул из области с большей концентрацией (плотностью  $\rho_1$ ) в область с меньшей концентрацией (плотностью  $\rho_2$ ).

**Самодиффузия** - процесс взаимного проникновения собственных молекул (атомов), обусловленный их тепловым движением.

Диффузия всегда сопровождается переносом массы вещества.

Явление диффузии описывается **законом Фика**:

Масса вещества, переносимая в результате диффузии через площадку  $\Delta S$  за время  $\Delta t$ , пропорциональна площади этой площадки, градиенту плотности и времени переноса:

$$\Delta M = -D \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t, \quad (5.15)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии;

$\Delta \rho / \Delta x$  - градиент плотности;

$\Delta S$  - площадь поверхности, через которую происходит перенос массы;

$\Delta t$  - промежуток времени.

Знак «минус» показывает, что масса переносится в направлении убывания концентрации (плотности), т.е. в направлении, противоположном направлению градиента плотности.

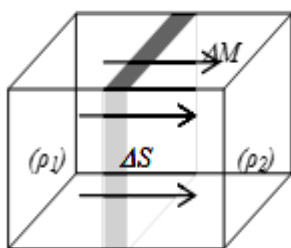


Рисунок 5.5

В системе СИ:

На рисунке 5.5 стрелками обозначено направление переноса массы  $\Delta M$ .

**Коэффициент диффузии  $D$**  - численно равен массе вещества, прошедшего через единичную площадку за единицу времени при градиенте плотности, равном единице:

$$|D| = \frac{\Delta M}{\frac{\Delta \rho}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t} \quad (5.16)$$

$$[D] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Диффузия играет важную роль в процессах жизнедеятельности клеток и тканей животных и растений. Например, диффузия кислорода из легких в кровь и из крови в ткани, всасывание продуктов пищеварения из кишечника, поглощение элементов минерального питания клетками корневых волосков. За счет диффузии происходит поддержание жизненно важных процессов клетки: непрерывное поступление в нее определенных веществ и одновременное выведение из клетки продуктов метаболизма.

В биологических системах диффузия может происходить в направлении, противоположном градиенту концентрации (*активный перенос* или *вынужденная диффузия*). Кроме того, в биологических мембранах выделяют еще один вид диффузии – *облегченная диффузия*. Облегченная диффузия происходит при помощи молекул переносчиков. Например, *валиномицин* - переносчик ионов калия. Облегченная диффузия происходит от мест с большей концентрацией переносимого вещества к местам с меньшей концентрацией.

Если в соседних слоях газа создана и поддерживается разность температур, то между ними будет происходить обмен тепла. Благодаря хаотическому движению, молекулы в соседних слоях будут перемешиваться. Происходит перенос энергии от более нагретых слоев к более холодным. В результате происходит выравнивание температур. Этот процесс называется *теплопроводностью*.

*Явление теплопроводности* – это явление при котором происходит перенос теплоты от более горячего слоя с температурой  $T_1$  к более холодному, температура которого  $T_2$ .

Закон теплопроводности был сформулирован **Фурье**:

Теплота  $\Delta Q$ , переносимая в результате теплопроводности через некоторую площадку, пропорциональна градиенту температуры  $\Delta T/\Delta x$ , площади  $\Delta S$  и промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого происходит перенос:

$$\Delta Q = -\chi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t, \quad (5.17)$$

где  $\chi$  - коэффициент теплопроводности;

$\Delta S$  - площадь поверхности, через которую происходит перенос тепла;

$\Delta T/\Delta x$  - скорость изменения (градиент) температуры в направлении  $x$ ;

$\Delta t$  - промежуток времени.

**Коэффициент теплопроводности  $\chi$**  - физическая величина, которая показывает, какое количество тепла переносится через единичную площадку за единицу времени при градиенте температуры, равном единице:

$$|\chi| = \frac{\Delta Q}{\frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t} \quad (5.18)$$

В системе СИ:

$$[\chi] = \frac{Вт}{м \cdot К}$$

В живых организмах осуществляется 4 вида теплопередачи, и все они важны для поддержания постоянства температуры внутренних органов.

1. **Теплопроводность** – способ отдачи тепла, имеющий место при контакте, соприкосновении тела человека с другими физическими телами.

В живом организме большую теплопроводность имеет мышечная ткань, в которой находится много кровеносных сосудов, что позволяет быстро переносить тепло от внутренних органов к внешним, предохраняя внутренние органы от перегрева. Кожа и подкожная жировая клетчатка имеют низкую теплопроводность и являются для организма теплоизолирующим слоем.

2. **Конвекция** – способ теплоотдачи организма, осуществляемый путем переноса тепла движущимися частицами воздуха (воды). Для рас-

сеивания тепла конвекцией требуется обтекание поверхности тела потоком воздуха с более низкой температурой, чем температура кожи.

На долю конвекции приходится 20% от общей теплоотдачи.

3. **Излучение** – это способ отдачи тепла в окружающую среду поверхностью тела человека в виде электромагнитных волн инфракрасного диапазона.

На долю теплового излучения у теплокровных животных приходится 50 – 60% от общей теплоотдачи.

4). **Испарение** – это способ рассеивания организмом тепла в окружающую среду за счет его затраты на испарение пота или влаги с поверхности кожи и влаги со слизистых дыхательных путей.

У человека постоянно осуществляется выделение пота потовыми железами кожи, увлажняются слизистые дыхательных путей. При интенсивном потоотделении, высокой влажности и малой скорости движения воздуха, когда капельки пота, не успевая испариться, сливаются и стекают с поверхности тела, теплоотдача путем испарения становится менее эффективной.

На испарение приходится 30% теплоотдачи.

Кроме того, явление теплопередачи широко используется в медицине: контактное приложение нагретых сред, светотепловое облучение, образование теплоты в тканях при прохождении высокочастотного переменного тока.

**Вязкость (внутреннее трение)** - явление переноса, в результате которого происходит перенос импульса молекул. Внутреннее трение возникает между слоями газа или жидкости, перемещающимися параллельно друг другу с разными по модулю скоростями, в результате чего более быстрые слои будут замедляться, а скорость медленных слоев будет увеличиваться.

Перенос импульса описывается уравнением:

$$\Delta P = -\eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t \quad (5.19)$$

Сила внутреннего трения определяется по **закону Ньютона**:

$$F = -\eta \cdot \Delta S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad (5.20)$$

где  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости;

$S$  - площадь поверхности, к которой приложена сила  $F$ ;

$\Delta v/\Delta x$  - градиент скорости.

**Физическая величина, численно равная силе внутреннего трения между двумя слоями жидкости или газа единичной площади при градиенте скорости, равном единице, называется коэффициентом динамической вязкости  $\eta$ :**

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot \Delta S} \quad (5.21)$$

В системе СИ:

$$[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$$

Вязкостью характеризует способность реальных жидкостей оказывать сопротивление движению в них тел или собственному течению за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Например, вязкость крови существенно влияет на ток крови в сердечно-сосудистой системе. Вязкость крови зависит от концентрации эритроцитов и белков плазмы, от их состава, от размеров клеток крови, эластичности мембран эритроцитов.

#### 5.4. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Сжижение газов и их применение в ветеринарии и медицине

При рассмотрении идеального газа предполагалось, что молекулы представляют собой материальные точки, собственным объемом которых и силами их взаимодействия можно пренебречь. В отличие от идеального газа молекулы реального газа имеют собственный определенный объем и взаимодействуют друг с другом. Эти отличия непрерывно возрастают с увеличением давления. При этих условиях уравнение Клапейрона - Менделеева непригодно для описания состояния реальных газов.

В 1873 г. голландский физик И. Ван-дер-Ваальс ввел в уравнение Клапейрона - Менделеева поправки на размер молекул и на действие сил притяжения между ними. Поправка к объему ( $b$ ) характеризует ту часть сосуда, которая недоступна движению молекул. Наличие такой «запрещенной» части обусловлено тем, что молекулы реального газа, в отличие от идеального, имеют вполне определенный объем. При этом свободный объем для хаотического движения молекул в сосуде окажется меньше на величину, равную учетверенному объему молекул газа  $b = 4 \cdot V_M \cdot N_A$ , т.е.  $V = V_{\text{сосуда}} - b$ .

Величина  $a/V_M^2$  представляет собой добавку к внешнему давлению. Ее наличие в уравнении обусловлено тем, что давление внутри реального газа всегда больше давления на стенки сосуда вследствие взаимного притяжения молекул. Если бы взаимодействие между молекулами вдруг исчезло, то для того, чтобы удержать газ в пределах того же объема, потребовалось бы увеличить внешнее давление на величину, равную внутреннему давлению  $p' = a/V_M^2$ .

Вводя эти поправки, получим **уравнение Ван-дер-Ваальса** для одного моля газа (**уравнение состояния реальных газов**):

$$\left(p + \frac{a}{V_M^2}\right) \cdot (V_M - b) = R \cdot T, \quad (5.22)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные Ван-дер-Ваальса, зависящие от природы газа.

Постоянные  $a$  и  $b$  для каждого газа имеют конкретные значения, определяемые опытным путем.

Для произвольной массы газа уравнение имеет вид:

$$\left(p + \frac{m^2}{M^2} \cdot \frac{a}{V^2}\right) \cdot \left(V - \frac{m}{M} \cdot b\right) = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (5.23)$$

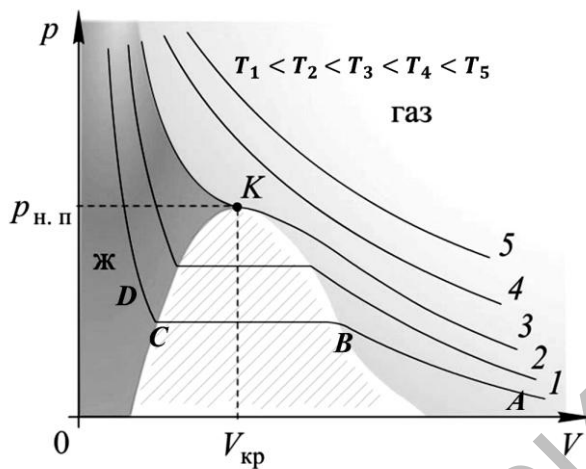


Рисунок 5.6

При фиксированной температуре уравнение Ван-дер-Ваальса описывает зависимость  $p=f(V)$ . На плоскости такая зависимость изображается в виде семейства **изотерм (изотермы Ван-дер-Ваальса)**, каждая из которых соответствует определенной температуре. Экспериментальные изотермы Ван-дер-Ваальса изображены на рисунке (рисунок 5.6).

Изотермы реального газа при высоких температурах практически совпадают с изотермами идеального газа. Так как молекулы идеального газа не имеют объема и не взаимодействуют между собой, то идеальный газ при любых изменениях его параметров остается газом. Совсем иначе ведут себя реальные газы.

При уменьшении температуры форма изотерм изменяется. Появляются области неустойчивости газового состояния и при определенных давлениях и температурах наблюдается переход из газообразного в жидкое состояние.

Рассмотрим газ, находящийся в сосуде под поршнем (рисунок 5.6). При уменьшении объема газа его давление возрастает (участок АВ). При достижении давления насыщенного пара (точка В) начинается процесс конденсации газа в жидкость. На участке ВС все большее количество газа переходит в жидкое состояние, при этом давление оставшегося газа не изменяется. Давление, при котором начинается сжижение газа, зависит от температуры: уменьшается с уменьшением температуры. После того как газ полностью конденсируется, давление вновь начинает возрастать (участок CD), но уже значительно быстрее, чем на участке АВ, так как жидкости слабо сжимаются.

Горизонтальные участки на изотермах соответствуют равновесию жидкости и насыщенного пара. При повышении температуры горизон-



тальный участок изотермы сужается и при определенной температуре стягивается в точку, которая называется *критической* (точка К). Соответствующая ей температура называется *критической температурой*  $T_k$ . Соответствующие ей значения  $p_k$  и  $V_k$  называют *критическим объемом* и *критическим давлением*.

При критической температуре плотность насыщенного пара и плотность жидкости становятся одинаковыми. Следовательно, можно сказать, что *при критической температуре исчезает различие между жидкостью и паром, вещество становится однородным*. При температуре выше  $T_k$  вещество может находиться только в газообразном состоянии.

*Критической* называется такая температура, выше которой газ не может быть переведен в жидкое состояние, ни при каком давлении.

Получается, что газ, находящийся при температуре выше критической, отличается от газа, находящегося при температуре, ниже критической. *Газ, находящийся при температуре, меньше критической, называется насыщенным паром*.

Состояние вещества, в котором параметры состояния равны критическим, называется *критическим состоянием*.

Таким образом, превращение газа в жидкость - сжижение газа - возможно лишь при температуре ниже критической. Однако критические температуры очень низкие, например He - 5,3 К; H<sub>2</sub> - 33 К; N<sub>2</sub> - 126,1 К.

Эффективными установками для сжижения газа являются детандеры – поршневые машины, в которых газ охлаждается не только за счет расширения, но и за счет совершения работы по перемещению поршня.

Сжиженные газы находят большое практическое и научное применение. В медицине жидкий воздух применяют для сохранения органов, в зооинженерной практике - для сохранения семян. Занимая сравнительно малый объем, жидкий воздух удобен для зарядки дыхательной аппаратуры. В технике из жидкого воздуха получают чистый кислород. Как источник низкой температуры его используют при производстве вакуумной аппаратуры. В микробиологии и вирусологии сжиженные газы (воздух, азот) применяют для хранения (от 3 до 5 лет) вирусов и переливаемых культур клеток.

Криометоды, применяемые в медицине, заключаются в разрушении патологических клеток при их замораживании до низких температур, например температуры жидкого азота (-196°C), и широко применяются в различных областях медицины: в гинекологии – для лечения патологии шейки матки; отоларингологии – для лечения хронического ринита, фарингита; онкологии – для лечения новообразований различного происхождения.

## Тема №6. Молекулярные явления в жидкостях

### 6.1. Особенности молекулярного строения жидкостей, явление поверхностного натяжения. Коэффициент поверхностного натяжения и методы его измерения

По своим физическим свойствам жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Жидкости, как и твердые тела, способны сохранять свой объем и у них существует свободная поверхность. В то же время жидкости, подобно газу, принимают в поле силы тяжести форму того сосуда, в который они налиты. Как и газ, жидкости обладают текучестью, а подобно твердым телам, они имеют очень малую сжимаемость и способны сопротивляться растяжению.

Малая сжимаемость жидкостей обусловлена тем, что им присуще довольно сильное межмолекулярное взаимодействие. Поэтому в жидкостях даже небольшое уменьшение расстояний между молекулами приводит к появлению больших сил отталкивания. По мере того как жидкость сжимается, уменьшаются расстояния между молекулами и увеличиваются силы отталкивания между ними, что затрудняет дальнейшее сжатие жидкости.

Характерным свойством жидкости является то, что на границе с газом жидкость образует свободную поверхность, наличие которой приводит к возникновению поверхностных явлений.

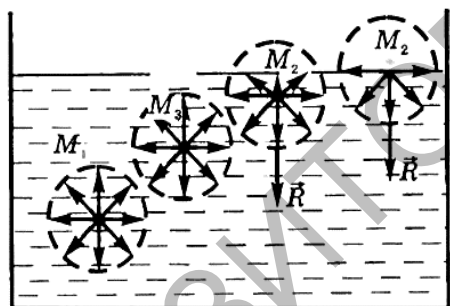


Рисунок 6.1

На каждую молекулу внутри жидкости действуют силы притяжения со стороны окружающих ее молекул (рисунок 6.1). На молекулы, расположенные внутри жидкости ( $M_1$ ,  $M_3$ ), действуют силы со стороны таких же молекул, и равнодействующая этих сил близка к нулю. Это не относится к молекулам, находящимся у поверхности жидкости ( $M_2$ ), в ее поверхностном слое. На молекулы поверхностного слоя действует сила, направленная внутрь жидкости, перпендикулярно ее поверхности. Объясняется это тем, что концентрация молекул жидкости над ее поверхностью (в паре или газе, с которым граничит жидкость) мала. Эта равнодействующая стремится втянуть данную молекулу во внутренние слои жидкости. Следовательно, весь поверхностный слой жидкости находится в особом состоянии. Он оказывает на жидкость некоторое давление, называемое *молекулярным*.

Кроме сил, действующих на молекулы поверхностного слоя в перпендикулярном направлении к поверхности, на них действуют силы в горизонтальном направлении (по касательной к поверхности жидкости). Они связывают молекулы поверхностного слоя между собой дополнительными силами притяжения. Суммарное действие этих сил называют *поверхност-*

**ным натяжением.** Они вызывают стремление жидкости сократить (уменьшить) свою поверхность (рисунок 6.2).

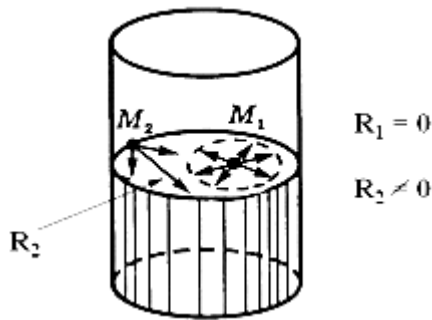


Рисунок 6.2

*Напряженное состояние молекул поверхностного слоя жидкости называется явлением **поверхностного натяжения.***

Сила поверхностного натяжения зависит от рода жидкости, ее температуры. Очевидно, что эта сила пропорциональна числу молекул в линии разрыва и, следовательно, длине контура  $l$ , ограничивающего поверхность жидкости.

Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности жидкости и определяется по формуле:

$$F_n = \sigma l, \quad (6.1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  
 $l$  – длина контура.

Под действием поверхностного натяжения небольшие количества жидких сред стремятся принять шарообразную форму, соответствующую наименьшей величине поверхности.

Поверхностное натяжение является важнейшей характеристикой поверхности раздела фаз. Оно непосредственно влияет на образование мелкодисперсных частиц жидкостей при их распылении, а также на слияние.

Поверхностное натяжение определяет форму биологических клеток и их частей. Изменение сил поверхностного натяжения влияет на фагоцитоз (захват клетками соседних частиц), пиноцитоз (захват клеточной поверхностью жидкости с содержащимися в ней веществами), на процессы альвеолярного дыхания капель или пузырьков в эмульсиях, туманах, пенах.

**Коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$**  называется величина, численно равная силе поверхностного натяжения  $F_n$ , действующей на единицу длины  $l$  границы свободной поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{F_n}{l}. \quad (6.2)$$

Единицы измерения в СИ **Ньютон на метр:**

$$[\sigma] = \frac{H}{M}$$

С другой стороны, коэффициент поверхностного натяжения показывает, какую работу необходимо совершить, чтобы увеличить площадь поверхности жидкости на единицу.

В этом случае  $\sigma$  определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S} \quad (6.3)$$

В этом случае коэффициент поверхностного натяжения измеряется в СИ в **джоулях на квадратный метр** ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ).

При повышении температуры силы притяжения между молекулами уменьшаются, соответственно снижается и коэффициент поверхностного натяжения.

Поверхностное натяжение различных веществ колеблется от 0,01 до 2,0 Н/м, у клеток оно не превышает 0,10 Н/м. Вещества, растворенные в жидкости, способны как понижать, так и повышать поверхностное натяжение. *Вещества, понижающие поверхностное натяжение раствора, называются поверхностно-активными веществами (ПАВ)*. К ним относятся, например, сурфактант, снижающий поверхностное натяжение альвеолярных стенок, обеспечивая тем самым возможность дыхания.

Определение коэффициента поверхностного натяжения является одним из важнейших диагностических показателей, определяющих состояние биологических систем.

Рассмотрим методы определения коэффициента поверхностного натяжения:

### 1. Метод отрыва капле (сталагмометрический метод)

Используемый прибор называется сталагмометром (рисунок 6.3).

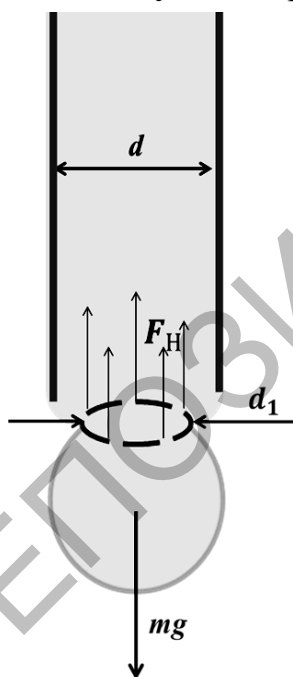


Рисунок 6.3

Суть метода состоит в определении числа капле, образующихся при вытекании данного объема жидкости из капиллярного отверстия специальной пипетки — сталагмометра. Определив при помощи одного и того же сталагмометра число капле ( $n$ ) исследуемой жидкости и число капле ( $n_0$ ) стандартной жидкости (обычно воды) с известным коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma_0$ , вычисляют коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости  $\sigma$  по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\rho n_0}{\rho_0 n}, \quad (6.4)$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  — плотности исследуемой жидкости и дистиллированной воды соответственно.

Метод отрыва капле используют для определения поверхностного натяжения биологических жидкостей в диагностических целях. Например, для некоторых форм желтухи характерно высокое содержание желчных солей в моче. Присутствие этих солей понижает поверхностное натяжение мочи, и поэтому их содержание можно

определить, проверив, всплывает или тонет определенное вещество в моче, в данном случае — порошок серы. Он не тонет в моче здорового пациента, но если в ней есть примесь желчных солей, то поверхностное натяжение недостаточно, и порошок серы тонет. Так, коэффициент поверхностного натяжения мочи в норме составляет  $6,6 \cdot 10^{-2}$  Н/м, а при наличии в моче желчных пигментов - значительно снижается.

## 2. Метод отрыва кольца

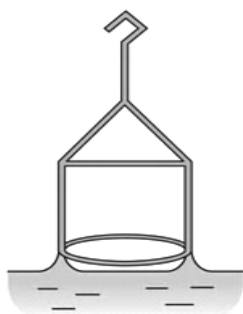


Рисунок 6.4

Кольцо, имеющее внутренний радиус  $r$  и внешний радиус  $R$ , кладут на поверхность исследуемой жидкости и с помощью прибора, измеряющего силу поверхностного натяжения, отрывают его (рисунок 6.4).

Сила поверхностного натяжения действует вдоль внешнего и внутреннего контура:  $F_{n,n} = \sigma \cdot (2\pi r + 2\pi R)$ , отсюда следует:

$$\sigma = \frac{F_n}{2\pi(r + R)} \quad (6.5)$$

## 6.2. Смачивание. Дополнительное давление под искривленной поверхностью жидкости. Капиллярные явления. Газовая эмболия

Вблизи границы между жидкостью, твердым телом и газом форма свободной поверхности жидкости зависит от сил взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела (взаимодействием с молекулами газа (или пара) можно пренебречь).

Возможны два случая: жидкость смачивает поверхность твердого тела и не смачивает его.

**Явление смачивания** наблюдается тогда, когда силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости друг с другом.

В этом случае жидкость будет стремиться увеличить поверхность соприкосновения и растечется по твердому телу. Говорят, что жидкость смачивает твердое тело.

**Явление несмачивания** наблюдается тогда, когда силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела меньше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости друг с другом.

В этом случае жидкость будет стремиться сократить поверхность соприкосновения с твердым телом. Говорят, что жидкость не смачивает твердое тело.

Одна и та же жидкость смачивает одни твердые тела и не смачивает другие. Например, вода смачивает стекло и не смачивает парафин; ртуть не смачивает стекло, но смачивает чистую поверхность меди и цинка. Ли-

ствя и стебли растений не смачиваются водой благодаря покрывающему их тонкому воскообразному налету. Поэтому они не размокают под дождем.

Мерой смачивания обычно служит краевой угол или косинус краевого угла (рисунок 6.5).

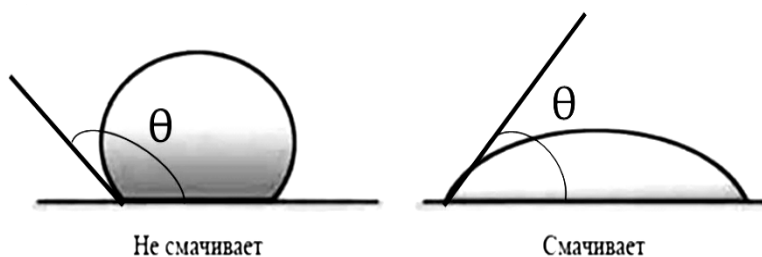


Рисунок 6.5

**Краевой угол  $\theta$**  – это угол, образованный поверхностью твердого тела и касательной к свободной поверхности жидкости, проходящей через точку, где граничит жидкость, твердое тело и газ.

Внутри краевого угла всегда находится жидкость.

Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, т.е. изменяется в пределах  $0 < \theta < 90^\circ$ .

Если  $\theta = 0$ , то наблюдается явление **полного смачивания**. В этом случае капля будет растекаться по поверхности твердого тела, покрывая ее тонкой пленкой.

Для несмачивающих жидкостей краевой угол изменяется в пределах  $90 < \theta < 180^\circ$ . В пределе краевой угол может стать  $180^\circ$ . Если  $\theta = 180^\circ$ , то имеет место **полное несмачивание**. В этом случае капля жидкости приобретает эллипсоидальную или сферическую форму.

Смачивание или несмачивание жидкостью стенок сосуда, в котором она находится, влияет на форму свободной поверхности жидкости в этом сосуде. Особенно отчетливо это видно в узких трубках, где искривляется вся поверхность жидкости.

Искривленная поверхность жидкости в узких трубках – капиллярах или около стенок сосудов называется **мениском** (от греч. *meniskus* – лунный серп, выпуклость). У смачивающей жидкости образуется **вогнутый мениск** (рисунок 6.6 а), а у несмачивающей – **выпуклый** (рисунок 6.6 б).

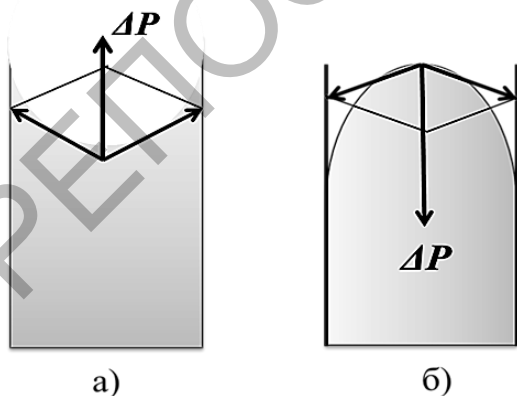


Рисунок 6.6

Так как площадь поверхности мениска больше, чем площадь внутреннего сечения трубки, то под действием молекулярных сил искривленная поверхность жидкости стремится выпрямиться и этим создает давление  $\Delta p$ , дополнительное к давлению  $p$ , действующему снаружи на жидкость.

При смачивании (вогнутый мениск) дополнительное давление направлено от жидкости и вычитается из внешнего давления  $p$ :  $p_{жс} = p - \Delta p$ .

При несмачивании (выпуклый мениск) дополнительное давление направлено внутрь жидкости и складывается с внешним давлением  $p$ :  
 $p_{жс} = p + \Delta p$ .

Величина дополнительного давления была определена французским ученым П. Лапласом, поэтому его часто называют *лапласовским давлением*.

Дополнительное давление под искривленной поверхностью любой формы определяется по формуле:

$$\Delta p = \pm \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (6.6)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух нормальных взаимно-перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

Знак «минус» соответствует вогнутому мениску, а знак «плюс» – выпуклому.

В случае сферической поверхности  $R_1 = R_2 = R_m$ , тогда дополнительное давление под искривленной поверхностью жидкости будет определяться по *формуле Лапласа*:

$$\Delta p = \pm \frac{2\sigma}{R}, \quad (6.7)$$

где  $R$  – радиус мениска;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Радиус мениска связан с радиусом капилляра формулой:

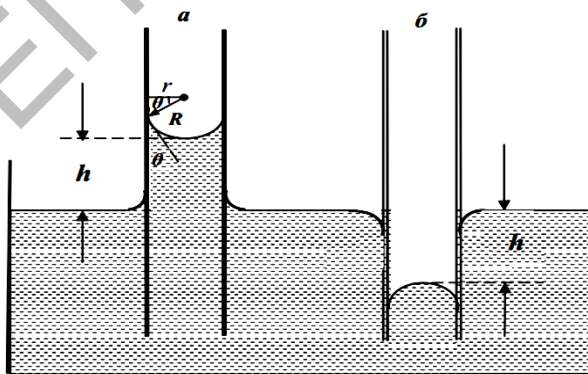
$$r = \frac{R}{\cos \theta},$$

где  $\cos \theta$  – косинус краевого угла.

Тогда *формула Лапласа* примет вид:

$$\Delta p = \pm \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos \theta, \quad (6.8)$$

где  $r$  – радиус мениска.



*Явления изменения высоты уровня жидкости в капиллярах по сравнению с уровнем жидкости в широком сосуде называются **капиллярными явлениями** (рисунок 6.7).*

Рисунок 6.7

Если жидкость смачивает стенки капилляра, то образуется вогнутый мениск (рисунок 6.7 а), молекулярное давление под которым на  $\Delta p$  меньше, чем в широком сосуде, сообщающемся с капилляром. Так как молекулярное давление под плоской поверхностью в широком сосуде на  $\Delta p$  больше, чем в капилляре, то оно выталкивает жидкость в капилляре вверх до тех пор, пока весовое (гидростатическое) давление столба жидкости высотой  $h$  не скомпенсирует дополнительное давление  $\Delta p$ , т. е.:

$$\Delta p = \rho gh, \quad (6.9)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

Если жидкость не смачивает капилляр, то образуется выпуклый мениск, молекулярное давление под которым на  $\Delta p$  больше, чем в широком сосуде. В этом случае жидкость установится ниже исходного уровня на глубину  $h$ , удовлетворяющую условию (рисунок 6.7 б).

Таким образом, в капилляре жидкость поднимается (или опускается) на такую высоту  $h$ , при которой гидростатическое давление столба жидкости уравнивает избыточное давление, обусловленное кривизной мениска:

$$h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}, \quad (6.10)$$

Учитывая формулу Лапласа (6.8), получим **формулу Жюрена-Борелли**:

$$h = \pm \frac{2\sigma}{\rho g R} = \pm \frac{2\sigma}{\rho g r} \cdot \cos \theta, \quad (6.11)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  
 $\rho$  – плотность жидкости;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $h$  – высота подъема (опускания) жидкости в капилляре;  
 $\theta$  – краевой угол.

Благодаря капиллярным явлениям пористые вещества – вата, бинт, почва и др. впитывают значительное количество жидкости из паров. Это приводит к увлажнению белья, ваты в сырых помещениях, затрудняет сушку гигроскопических тел. Капиллярные явления играют большую роль в самых разнообразных процессах, происходящих в природе. Например, проникновение влаги и питательных растворов по стеблю или стволу растения происходит благодаря капиллярным явлениям. По капиллярам почвы поднимается вода из глубинных в поверхностные слои почвы.

Несмачивающая жидкость не может глубоко проникнуть в поры твердого тела. С этим связана, например, непроницаемость для воды перьев птиц, смазанных жиром.



С поверхностным натяжением связано и явление *газовой эмболии*, при котором пузырек газа способен затруднить и даже остановить кровоток в мелких сосудах и лишить кровоснабжения какой-либо орган, что может привести к серьезному функциональному расстройству.

Рассмотрим поведение пузырька воздуха, находящегося в капилляре

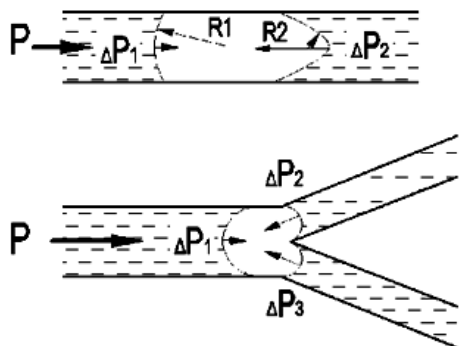


Рисунок 6.8

с жидкостью. Пока диаметр газового пузырька меньше диаметра сосуда, он имеет сферическую форму и движется вместе с током крови. Если он попадает в мелкий сосуд, диаметр которого меньше диаметра пузырька, его мениски деформируются под давлением текущей крови: передний по току крови мениск вытягивается, его радиус кривизны уменьшается, а задний - под напором крови уплощается, его радиус кривизны увеличивается.

Соответственно, дополнительные молекулярные давления, действующие на эти мениски, будут не одинаковы и направлены навстречу, а их результирующая сила, приложенная к пузырьку, будет направлена против тока крови, противодействуя ему (рисунок 6.8 а), вплоть до остановки кровотока. Когда газовый пузырек попадает на разветвление сосудистого русла, то может полностью остановить кровоток в дистально расположенных сосудах (рисунок 6.8 б). Таким образом, попавшие в кровь пузырьки воздуха способны закупорить мелкие сосуды. Воздушная эмболия может возникнуть при ранении крупных вен, где давление крови ниже атмосферного, при неправильно проведенных внутривенных инъекциях и в других ситуациях.

Газовые пузырьки в крови человека и животных могут появиться и при резком снижении внешнего давления на организм. Это обусловлено уменьшением растворимости газов (в первую очередь – азота) в крови и переходом их из растворенного состояния в газообразное в результате резкого снижения окружающего давления. С подобной проблемой могут столкнуться водолазы при быстром подъеме с большой глубины на поверхность (кессонная болезнь), летчики и космонавты при разгерметизации кабины или скафандра на большой высоте.

### 6.3. Влажность и методы ее измерения

На свободной поверхности жидкости происходит процесс *испарения*, при котором жидкость постепенно переходит в газообразное состояние. Процесс испарения состоит в том, что отдельные молекулы, находящиеся вблизи поверхности жидкости, преодолевают силы притяжения соседних молекул и вылетают за пределы жидкости. В свою очередь молекулы пара вблизи поверхности жидкости могут притягиваться ее молекулами и вновь возвращаться в жидкость. Этот процесс называется *конденсацией*.

На поверхности жидкости всегда происходит оба процесса: испарение и конденсация. Если количество испаряющихся молекул и конденсирующихся в единицу времени одинаково, то пар находится в динамическом равновесии с жидкостью, такой пар называется *насыщенным*.

Поскольку с поверхностями океанов, морей, озер и рек происходит непрерывное испарение воды, в атмосфере Земли всегда содержится водяной пар.

*Величина, характеризующая содержание водяных паров в различных частях Земли, называется влажностью* воздуха.

Для количественной оценки влажности воздуха используют *абсолютную* и *относительную влажность*.

*Абсолютную влажность* воздуха измеряют *плотностью* водяного пара  $\rho_a$ , находящегося в воздухе, или его давлением  $p_a$ .

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad (6.12)$$

Более ясное представление о влажности воздуха дает относительная влажность.

*Относительную влажность* измеряют числом, показывающим, сколько процентов составляет абсолютная влажность  $\rho_a$  от плотности водяного пара  $\rho_n$ , нужной для насыщения воздуха при данной температуре:

$$B = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\% \quad (6.13)$$

Относительную влажность можно определить и по давлению:

$$B = \frac{p_a}{p_n} \cdot 100\% \quad (6.14)$$

Относительная влажность определяется не только абсолютной влажностью, но и температурой воздуха. При вычислении относительной влажности значения  $\rho_n$  и  $p_n$  берут из таблиц.

Нормальным для жизнедеятельности человека считается атмосферный воздух с относительной влажностью от 40% до 60%, для наземных животных – 40-50%.

*Температура, при которой воздух в процессе своего охлаждения становится насыщенным водяными парами, называется точкой росы.*

Приборы для определения влажности воздуха называются *гигрометрами*, а относительную влажность измеряют *психрометрами*.

Влажность воздуха имеет большое значение для жизнедеятельности живого организма.

Высокая влажность воздуха (85% и выше) при высоких температурах ухудшает теплоотдачу путем испарения. В результате возникает перегрев организма или тепловой удар.

Высокая влажность воздуха в сочетании с низкой температурой также вредна для животных. В этом случае увеличивается теплоотдача, затрудняется дыхание, ухудшается аппетит, ослабляется пищеварение, снижается продуктивность животных. Сырость в помещении способствует сохранению и распространению в них ряда патогенных микроорганизмов и возбудителей инфекционных заболеваний. При содержании животных в сырых помещениях отмечаются такие заболевания, как ринит, бронхит, воспаление легких, мастит коров, желудочно-кишечные заболевания, туберкулез, бруцеллез и другие. В сырых помещениях снижается молочная продуктивность коров и прирост живой массы молодняка.

Сухой воздух (до 50%) высушивает кожу животных и слизистые оболочки, что повышает их ранимость и увеличивает проницаемость для микроорганизмов. Усиливается потоотделение, жажда, животные потребляют много воды, понижается аппетит, продуктивность, устойчивость к заболеваниям.

Таким образом, определенная влажность воздуха, соответствующая физиологическому состоянию организма, является важным условием его нормальной жизнедеятельности. В связи с этим необходимо поддержание нормальной влажности в вивариях и в животноводческих помещениях.

## Тема №7. Физические основы термодинамики. Основы термодинамики биологических систем.

### 7.1. Работа в термодинамической системе. Первое начало термодинамики и его приложение к изопротессам

Исторически термодинамика возникла как раздел физики, изучающий соотношение между теплотой и работой.

В основе термодинамики лежат основные законы (начала), которые являются обобщением опытных данных и служат для объяснения различных явлений и экспериментально установленных законов.

Рассмотрим основные понятия термодинамики.

**Термодинамическая система** – это тело или группа тел, условно выделенные из окружающей среды, с которыми происходят термодинамические процессы.

Примерами систем могут служить клетка, сердце, организм, биосфера и т.п.

В зависимости от взаимодействия с окружающей средой все системы делятся на три вида:

- **изолированные системы** – это системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом;
- **закрытые системы** – это системы, которые обмениваются с окружающей средой энергией, но не обмениваются веществом;
- **открытые системы** обмениваются с внешней средой и энергией, и веществом.

Описать состояние любой термодинамической системы можно с помощью макроскопических переменных величин, которые называются **параметрами состояния**. Такими параметрами являются *температура, объем, давление, энтропия*, то есть такие физические величины, с помощью которых можно описать состояние конкретной термодинамической системы в данное время. Если хотя бы один из параметров меняется, то изменяется состояние системы, говорят, что в системе происходит **термодинамический процесс**.

Все термодинамические процессы можно разделить на *обратимые* и *необратимые*.

*Процесс называют обратимым, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.*

После проведения обратимого процесса никаких изменений ни в самой системе, ни в окружающей систему среде не произойдет.

*Процесс называется необратимым, если он протекает так, что после его окончания систему нельзя вернуть в начальное состояние через прежние промежуточные состояния. Нельзя осуществить необратимый*

процесс, чтобы нигде в окружающей среде не осталось никаких изменений.

Тела, участвующие в термодинамических процессах, обмениваются между собой энергией, при этом внутренняя энергия этих тел изменяется.

Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  может быть осуществлено двумя способами:

1- путем сообщения телу теплоты, то есть через теплопередачу (теплопроводность, конвекция и излучение);

2 - путем совершения над телом работы  $A$ .

**Теплота** (количество теплоты  $\Delta Q$ ) является энергией, переданной от одной системы другой из-за разницы их температур.

Простейшей термодинамической системой является газ, заключенный в сосуде с подвижным поршнем.

Пусть газ заключен в сосуд, отделен от окружающего пространства невесомым поршнем и занимает объем  $V_1$  (рисунок 7.1). Нагреем газ, передадим ему количество теплоты  $\Delta Q$ . Тогда газ, расширяясь, поднимет поршень на величину  $\Delta h$ , совершая при этом работу:

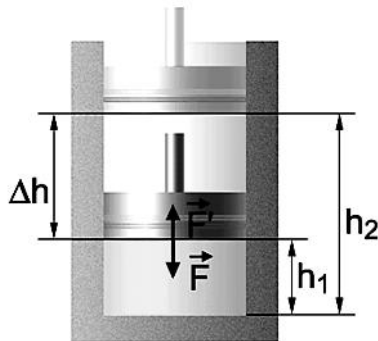


Рисунок 7.1

$$A = F \cdot \Delta h,$$

где  $F = P \cdot S$  - сила давления;  
 $S$  - площадь поршня.

Следовательно, работа:

$$A = p \cdot S \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V, \quad (7.1)$$

где  $\Delta V = V_2 - V_1$  - изменение объема газа при нагревании.

При расширении газа  $\Delta V > 0$  газ совершает положительную работу. Если газ сжимается, то  $\Delta V < 0$  и работа  $A < 0$ . В этом случае работу над газом совершают внешние силы.

Первый закон термодинамики является законом сохранения энергии. Он указывает, что общая энергия в изолированной системе является величиной постоянной и не изменяется с течением времени, а лишь переходит из одной формы в другую.

**Первый закон термодинамики:**

*Количество теплоты, сообщаемой термодинамической системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы системой против внешних сил:*

$$\Delta Q = \Delta U + A \quad (7.2)$$

## **Первое начало термодинамики в применении к изопроцессам:**

**1. Изотермический процесс** - процесс, протекающий при постоянной температуре.

При  $T = const$  внутренняя энергия системы не изменяется  $\Delta U=0$ , и тогда первое начало термодинамики будет иметь вид:

$$\Delta Q = A \quad (7.3)$$

Вывод: при термодинамическом процессе все количество теплоты, подведенное к системе, идет на совершение работы против внешних сил.

При этом работа определяется по формуле:

$$A = R \cdot T \cdot \frac{m}{M} \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (7.4)$$

где  $R=8,31$  Дж/К·моль – универсальная газовая постоянная;

$T$  – термодинамическая температура;

$m$  – масса газа;

$M$  – молярная масса газа;

$V_2, V_1$  - конечный и начальный объем газа.

**2. Изобарический процесс** – процесс, протекающий при постоянном давлении.

При  $p = const$  изменяется объем и температура, а следовательно, газом совершается работа, и изменяется его внутренняя энергия. Тогда первое начало термодинамики для изобарического процесса будет иметь вид:

$$\Delta Q = A + \Delta U \quad (7.5)$$

Вывод: при изобарическом процессе количество теплоты, подведенное к системе, идет на изменение внутренней энергии и совершение работы против внешних сил.

При этом работа определяется по формуле:

$$A = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) \quad (7.6)$$

**3. Изохорический процесс** - процесс, протекающий при постоянном объеме.

При  $V = const$  изменение объема не происходит  $\Delta V = 0$ , а следовательно, работа газом не совершается  $A=0$ . Тогда первое начало термодинамики будет иметь вид:

$$\Delta Q = \Delta U \quad (7.7)$$

Вывод: при изохорическом процессе количество теплоты, подведенное к системе, идет на изменение внутренней энергии газа.

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

Если в результате теплообмена телу передается некоторое количество теплоты, то внутренняя энергия тела и его температура изменяются.

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для нагревания 1 кг вещества на 1 К, называют **удельной теплоемкостью вещества  $c$** :

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (7.8)$$

где  $\Delta Q$  — количество теплоты, полученное веществом при нагреве (или выделившееся при охлаждении);

$m$  — масса нагреваемого (охлаждающегося) вещества;

$\Delta T$  — разность конечной и начальной температур вещества.

В СИ измеряется в **джоулях на килограмм на кельвин**:

$$[c] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Во многих случаях удобно использовать **молярную теплоемкость  $C$**  - количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моля газа на 1 градус:

$$C = \frac{M \cdot \Delta Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (7.9)$$

В СИ измеряется в **джоулях на моль на кельвин**:

$$[C] = (\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1})/(\text{К})$$

Удельная и молярная теплоемкости связаны соотношением:

$$C = M \cdot c \quad (7.10)$$

Газ в процессе теплопередачи может сильно изменять свой объем и совершать работу. Поэтому теплоемкость газообразного вещества зависит от характера термодинамического процесса.

Если газ нагревать при постоянном объеме, то все подводимое тепло идет на нагревание газа, т. е. изменение его внутренней энергии.

Молярная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot \frac{M}{m}$ , так

как мы имеем 1 моль идеального газа, то  $C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$

Согласно первому началу термодинамики для изохорического процесса  $\Delta Q = \Delta U$ , тогда

$$C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{i \cdot R \cdot \Delta T}{2 \cdot \Delta T} = \frac{i}{2} \cdot R$$

Получили:  $C_v = \frac{i}{2} R$ , (7.11)

где  $i$  – число степеней свободы;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная.

Если нагревать газ при постоянном давлении  $p$  в сосуде с поршнем, то поршень поднимется на некоторую высоту  $h$ , т. е. газ совершит работу. В этом случае подводимое к телу тепло тратится не только на изменение внутренней энергии, но и на совершение работы.

При постоянном давлении:  $C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$

Первое начало термодинамики для изобарического процесса имеет вид  $\Delta Q = \Delta U + A$ .

$$\text{Тогда } C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{A}{\Delta T} = \frac{i}{2} \cdot R + \frac{A}{\Delta T} = C_v + \frac{A}{\Delta T}$$

Так как нагревание происходит на 1 Кельвин ( $\Delta T = 1K$ ), то

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{i}{2} \cdot R + A = C_v + A$$

Отсюда видно, что  $C_p > C_v$  на величину  $A$ , равную работе, которую совершает 1 моль газа при изобарическом нагревании на 1 Кельвин. А по уравнению Менделеева-Клапейрона для одного моля идеального газа  $A = p \cdot \Delta V = R \cdot \Delta T$ . И так как нагревание газа происходит на  $\Delta T = 1K$ , то  $A = R \cdot \Delta T = R$ .

**Универсальная газовая постоянная  $R$**  – величина, численно равная работе, которую необходимо совершить, чтобы нагреть 1 моль вещества на 1 Кельвин изобарическим путем.

Молярные теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  оказываются связанными простым соотношением, называемым **уравнением Майера**:



$$C_p = \frac{i}{2} \cdot R + R = C_v + R \quad (7.12)$$

Очень часто на практике приходится иметь дело с процессами, протекающими без теплообмена с окружающей средой, т.е.  $\Delta Q = 0$ .

Такие процессы называют **адиабатическими**. Примером адиабатического процесса может служить быстро протекающий процесс сжатия или расширения газа.

Согласно первому началу термодинамики  $\Delta Q = A + \Delta U$ . При адиабатическом процессе  $\Delta Q = 0$ , тогда получим:

$$0 = A + \Delta U, \text{ или } A = -\Delta U \quad (7.13)$$

При адиабатическом процессе работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа.

Работа, совершаемая газом при адиабатическом процессе, определяется по формуле:

$$A = \frac{m}{M} \cdot C_v \cdot (T_1 - T_2) \quad (7.14)$$

Если газ при адиабатическом расширении совершает работу, то его внутренняя энергия уменьшается. Если над газом совершают работу внешние силы, то его внутренняя энергия увеличивается.

Состояние идеального газа при адиабатическом процессе описывается **уравнением Пуассона**:

$$p \cdot V^\gamma = const \text{ и } T \cdot V^{\gamma-1} = const, \quad (7.15)$$

где  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$  - коэффициент Пуассона.

Для постоянной массы газа при постоянном количестве тепла произведение давления газа на его объем в степени  $\gamma$  остается величиной постоянной.

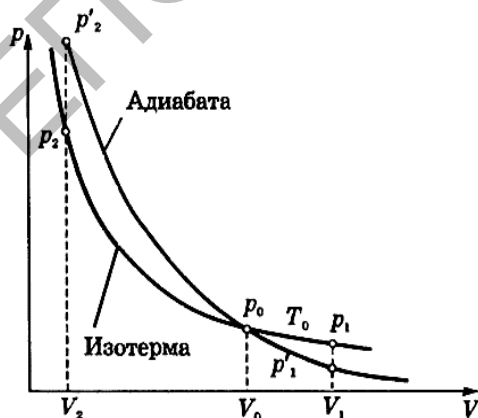


Рисунок 7.2

Графически адиабатический процесс можно представить **адиабатой**. При этом адиабата располагается более круто, чем изотерма (рисунок 7.2).

Объясняется это тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления обусловлено не только уменьшением объема газа, как при изотермическом сжатии, но также еще и увеличением температуры. При

адиабатическом расширении температура газа уменьшается, поэтому давление газа падает быстрее, чем при изотермическом расширении.

### 7.3. Второе начало термодинамики. Принцип работы простейшей тепловой машины. Количество приведенной теплоты. Энтропия, изменение энтропии

Первое начало термодинамики характеризует процессы превращения энергии с количественной стороны, но не указывает их направление. Тогда как опыт свидетельствует, что все реальные процессы передачи энергии имеют четко определенную направленность. Направление протекания термодинамических процессов определяет второе начало термодинамики.

Одной из формулировок второго начала термодинамики является **формулировка Клаузиуса**, согласно которой *теплота не может передаваться самопроизвольно от тела, обладающего более низкой температурой, телу с более высокой температурой*. Каждый реальный процесс, происходящий в термодинамической системе, может осуществляться только в одном направлении.

Исторически второе начало термодинамики возникло из анализа работы тепловых двигателей. Рассмотрим принцип действия простейшей тепловой машины.

**Тепловой машиной** называется *периодически действующий механизм, который преобразует внутреннюю энергию топлива в механическую работу*.

В основе всех тепловых машин (двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, паровых и холодильных машин и т. д.) лежат круговые процессы.

**Круговой процесс (цикл)** - процесс, при котором физическая система (например, газ), претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние.

Термодинамические параметры системы ( $T$ ,  $p$ ,  $V$ ,  $U$ ,  $S$  и др.) в конце кругового процесса вновь принимают первоначальное значение и, следовательно, их изменения равны нулю ( $\Delta U = 0$  и т. д.). Все изменения, возникающие в результате кругового процесса, происходят только в среде, окружающей систему.

Любая тепловая машина работает по принципу кругового (циклического) процесса, т. е. возвращается в исходное состояние.

Но чтобы при этом была совершена полезная работа, возврат должен быть произведен с наименьшими затратами.

Обязательными частями тепловой машины являются *нагреватель* (источник энергии), *холодильник*, *рабочее тело* (газ, пар) (рисунок 7.3).

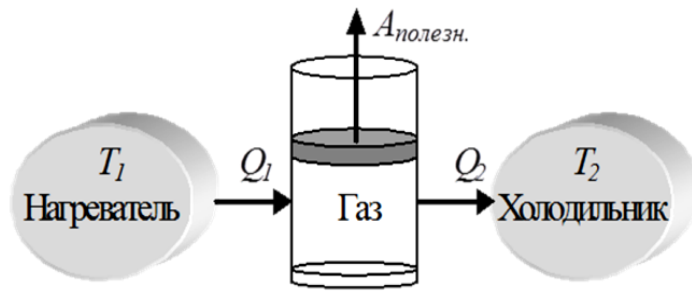
Цикл работы теплового двигателя состоит из трех этапов:

1 - нагреватель передает газу количество теплоты  $Q_1$ , при этом температура нагревателя  $T_1$  остается постоянной за счет сгорания топлива;

2 - газ, расширяясь, совершает работу  $A$ ;

3 - для возвращения газа в исходное состояние холодильнику передается теплота  $Q_2$ , температура которого  $T_2 < T_1$ .

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние, и, следовательно, полное изменение внутренней энергии газа равно нулю ( $\Delta U = 0$ ).



Рабочее тело

Рисунок 7.3

Поэтому первое начало термодинамики для кругового процесса запишется:  $\Delta Q = A$ .

Работа, совершенная системой, определяется разностью между полученным и отданным количеством теплоты:

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (7.16)$$

Отношение работы  $A$  к количеству теплоты  $Q_1$ , полученному рабочим телом за цикл от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия  $\eta$**  тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (7.17)$$

Коэффициент полезного действия указывает, какая часть тепловой энергии, полученной рабочим телом от нагревателя, превратилась в полезную работу. Остальная часть была «бесполезно» передана холодильнику.

Из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей и холодильников, наибольшим КПД обладают машины, работающие по циклу Карно (идеальные тепловые машины). Причем, КПД таких машин не зависят от конструкции машины и от природы рабочего вещества, а зависят от разности температур между нагревателем и холодильником.

В этом случае КПД определяется по формуле:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (7.18)$$

При этом коэффициент полезного действия реальной тепловой машины (7.15) не больше КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно. Знак равенства соответствует обратимому циклу.

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (7.19)$$

Таким образом, коэффициент полезного действия меньше единицы  $\eta < 1$ , а это значит, что часть полезной энергии превращается в бесполезную или обесценивается.

**Второй закон термодинамики** указывает на то, что все реальные процессы (в том числе в биологических системах) сопровождаются рассеянием некоторой части энергии.

Все формы энергии (механическая, химическая, электрическая и т.п.) могут быть превращены в теплоту без остатка. Но сама теплота не может превращаться полностью в другие формы энергии. Не существует двигателя или процесса, который бы преобразовывал теплоту в другую форму энергии со 100% эффективностью.

Характеристикой состояния системы и направления протекания самопроизвольных процессов в термодинамической системе является **энтропия**  $S$ . Понятие энтропии впервые введено Р. Клаузиусом в 1865 году.

**Энтропия** – функция состояния термодинамической системы, характеризующая направление протекания самопроизвольных процессов в этой системе и являющаяся мерой их необратимости.

Каждому состоянию системы соответствует только одно определенное значение энтропии.

Поясним смысл данной величины.

**Энтропия** – это мера беспорядка в системе. Можно сказать, что каждая система стремится перейти к состоянию максимального молекулярного беспорядка или хаоса. Таким образом, чем меньше порядка в системе, тем больше ее энтропия.

**Энтропия** – это мера обесценивания энергии, т.е. характеризует ту часть энергии, которую нельзя превратить в работу. Чем больше возрастание энтропии при каком-либо процессе, тем больше рассеяние энергии и тем более необратим данный процесс.

**Энтропия** – это мера термодинамической вероятности состояния системы.

Связь энтропии с термодинамической вероятностью установил Больцман:

$$S = k \cdot \ln w, \quad (7.20)$$

где  $S$  – энтропия;

$k$  – постоянная Больцмана;

$w$  – термодинамическая вероятность, то есть число способов, которыми достигается данное состояние.

Чем больше упорядоченность в данной системе, тем меньше ее термодинамическая вероятность, и, следовательно, тем меньше энтропия.

Каждая система стремится к переходу из менее вероятного высокоупорядоченного состояния в статистически более вероятные состояния, характеризующиеся беспорядочным расположением молекул. Самопроизвольно протекают только такие процессы, при которых эта функция или увеличивается (необратимые), или остается постоянной (обратимые).

Изменение энтропии в равновесном процессе равно отношению количества теплоты, сообщенного системе или отведенного от нее, к термодинамической температуре системы:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (7.21)$$

В СИ измеряется в **джоуль на кельвин**:

$$[\Delta S] = \text{Дж/К}$$

В обратимых процессах рассеяния энергии не происходит, то есть изменение энтропии  $\Delta S_{\text{обр}} = 0$ , для необратимых процессов  $\Delta S_{\text{необр}} > 0$ .

**Все реальные процессы протекают с увеличением энтропии.** Данное утверждение является одной из формулировок второго начала термодинамики.

Первое и второе начала термодинамики можно объединить в **основное уравнение термодинамики**:

$$T \cdot \Delta S \geq \Delta U + A \quad (7.22)$$

Если работа выполняется посредством расширения газа против внешних сил, то основное уравнение термодинамики принимает вид:

$$T \cdot \Delta S \geq \Delta U + p \cdot \Delta V \quad (7.23)$$

Внутренняя энергия системы  $U$  равна сумме свободной ( $F$ ) и связанной энергии ( $TS$ ):  $U = F + T \cdot S$

**Связанная энергия ( $TS$ )** – это часть внутренней энергии, которая не может быть превращена в работу, то есть это обесцененная часть внутренней энергии. Величина этой энергии зависит от энтропии  $S$ . При одной и той же температуре связанная энергия тем больше, чем больше энтропия.

**Свободная энергия ( $F$ )** - это та часть внутренней энергии  $U$ , которую система может превратить в работу.

Таким образом, все процессы в природе протекают в направлении уменьшения свободной энергии и увеличения энтропии.

Состояние системы, при котором свободная энергия равна нулю, а энтропия — максимальному значению, называется **термодинамическим равновесием**. В состоянии термодинамического равновесия система полностью деградирована и не способна совершать работу.

#### 7.4. Термодинамика открытых биологических систем. Формула Пригожина

Одним из условий нормального функционирования отдельной клетки и целого организма является поддержание постоянства их параметров (концентраций веществ, электрических потенциалов и других) и, в случае необходимости, изменение их в нужном направлении. Это требует обмена веществом и энергией с окружающей средой, превращение одних видов энергии в другие, как, например, при мышечных сокращениях, передаче нервного импульса и др. Поэтому *все живые организмы являются открытыми термодинамическими системами*. Открытые системы стремятся перейти в состояние термодинамического равновесия. Но равновесное состояние для живого организма равноценно гибели, так как в этом случае невозможно протекание никаких направленных процессов. Поэтому, рассматривая биологические системы, говорят о **стационарном состоянии**.

В стационарном состоянии параметры также не меняются с течением времени, но могут отличаться в различных частях системы, то есть в таких системах существуют и постоянно поддерживаются градиенты параметров. Это возможно только за счет притока энергии или вещества из окружающей среды.

Поэтому общее изменение энтропии  $\Delta S$  в биологических системах происходит как за счет выделения теплоты в результате необратимых процессов в самой системе, так и за счет притока теплоты извне. Полное изменение энтропии  $\Delta S$  биологической системы условно можно представить в виде суммы двух частей:

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e, \quad (7.24)$$

где  $\Delta S_i$  — изменение энтропии, связанное с необратимыми процессами, протекающими внутри биологической системы;

$\Delta S_e$  — изменение энтропии вследствие обмена системы с окружающей средой (получение извне необходимых веществ и выделение продуктов жизнедеятельности), в результате чего в организм поступает свободная энергия.

В процессе роста организма и его старения, при различных отклонениях от физиологической нормы энтропия биологической системы со временем может меняться в определенных допустимых пределах, поэтому характерным параметром термодинамической системы в этом случае будет **скорость изменения энтропии  $\Delta S/\Delta t$** .

Скорость изменения энтропии открытой термодинамической системы будет определяться по формуле:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta S_i}{\Delta t} + \frac{\Delta S_e}{\Delta t} \quad (7.25)$$

Таким образом, скорость изменения энтропии открытой системы равна сумме скорости изменения энтропии за счет взаимодействия системы с внешней средой и скорости изменения энтропии, вызванного необратимыми процессами.

Необратимые процессы, протекающие внутри системы, вызывают повышение энтропии, поэтому всегда  $\Delta S_i/\Delta t > 0$ . Однако общая энтропия системы может как возрастать, так и убывать:

1. Энтропия увеличивается  $\frac{\Delta S}{\Delta t} > 0$ , если  $\frac{\Delta S_e}{\Delta t} > 0$ , что соответствует патологическому состоянию организма, так как при этом уменьшается степень упорядоченности системы. Это наблюдается, например, при разложении тканей, при наличии онкологических заболеваний (происходит неконтролируемый неупорядоченный рост клеток).

2. Энтропия уменьшается  $\frac{\Delta S}{\Delta t} < 0$ , если  $\frac{\Delta S_e}{\Delta t} < 0$  и  $\left| \frac{\Delta S_e}{\Delta t} \right| > \frac{\Delta S_i}{\Delta t}$ . Данный случай соответствует повышению уровня организации организма (росту, формированию органов, тканей, систем).

3. Энтропия не изменяется  $\frac{\Delta S}{\Delta t} = 0$ , если  $\frac{\Delta S_e}{\Delta t} < 0$ . Этот случай соответствует стационарному состоянию системы.

При этом 
$$\left| \frac{\Delta S_e}{\Delta t} \right| = \frac{\Delta S_i}{\Delta t} \quad (7.26)$$

Равенство (7.26) является **условием стационарного состояния открытой системы**. Его смысл заключается в том, что для обеспечения стационарного состояния открытая система должна обмениваться с окружающей средой энергией и веществом в таком количестве, которые обеспечивали бы такую же скорость уменьшения ее положительной энтропии или увеличения отрицательной энтропии.

В стационарном состоянии находится вся сеть биохимических превращений в организме. Как было отмечено, в организме протекают необратимые процессы. Вследствие этого скорость производства энтропии в организме больше нуля:

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta t} > 0 \quad (7.27)$$

И. Пригожин на основе изучения открытых систем сформулировал основное **свойство стационарного состояния**: *в стационарном состоянии скорость возрастания энтропии, обусловленного протеканием необратимых процессов, имеет положительное и минимальное из возможных значений.*

Это положение получило название **теоремы Пригожина**. Энтропия является мерой рассеивания свободной энергии. Следовательно, при стационарном состоянии рассеивание свободной энергии бывает минимальным. Система для поддержания стационарного состояния требует минимального из всех возможных значений притока свободной энергии. *Организм стремится работать на наиболее выгодном энергетическом уровне.* Это свойство имеет большое значение для поддержания устойчивости стационарного состояния. Если система почему-либо отклонится от стационарного состояния, то в силу стремления системы к минимальному производству энтропии в ней наступят внутренние изменения, которые будут приближать систему к стационарному состоянию. Это свойство стационарной системы называется *аутостабилизацией*.

Стационарное состояние организмов поддерживается с помощью механизмов авторегулирования.

Например, способность теплокровных животных поддерживать температуру тела на постоянном уровне обеспечивается за счет взаимосвязанных процессов - *телопродукции* и *теплоотдачи* организма во внешнюю среду. Если теплообразование равно теплоотдаче, то температура тела остается постоянной. Так, например, повышение температуры внешней среды, действуя на механизмы терморегуляции, приводит к уменьшению организмом теплопродукции к увеличению теплоотдачи. При понижении температуры окружающей среды рефлекторно повышается интенсивность метаболических процессов и усиливается теплообразование.

**Процессы теплоотдачи** происходят следующими путями - *излучение, конвекция, испарение и теплопроводность и др.*

Теплообразование происходит вследствие непрерывно совершающихся экзотермических реакций. Эти реакции протекают во всех органах и тканях, но неодинаково интенсивно и носят название химической терморегуляции. В тканях и органах, производящих активную работу, — в мышечной ткани, печени, почках выделяется большее количество тепла, чем в менее активных — соединительной ткани, костях, хрящах.

В случае, когда для поддержания температуры тела необходимо дополнительное тепло, оно может быть выработано произвольной активностью мышечного аппарата, непроизвольной активностью - дрожь (сократительный термогенез), ускорением обменных процессов, не связанных с сокращением мышц (несократительный термогенез).

**Теплопродукция** - *это количество теплоты, выделяемое животным в единицу времени.*



Теплопродукция организма может быть выражена как сумма:

$$Q_T = Q_B + Q_C = aM + bM^{2/3}, \quad (7.28)$$

где  $Q_B$  – теплопродукция при взаимодействии клеток между собой и пропорциональна массе всех клеток организма  $M$ ;

$Q_C$  – теплопродукция, обусловленная взаимодействием организма с окружающей средой и пропорциональна площади поверхности  $M^{2/3}$ ;

$a, b$  – некоторые коэффициенты.

**Удельная теплопродукция** - это величина, численно равная количеству теплоты, выделяемой единицей массы животного в единицу времени:

$$q = \frac{Q}{M \cdot t} = \frac{Q_T}{M} = a + \frac{b}{\sqrt[3]{M}} \quad (7.29)$$

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  будут следующими:

$a=41,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{сут})$ ,  $b=244 \text{ кДж}/(\text{кг}^{2/3} \cdot \text{сут})$  - для теплокровных животных (гомойотермных);

$a=33 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{сут})$ ,  $b=7,97 \text{ кДж}/(\text{кг}^{2/3} \cdot \text{сут})$  - для холоднокровных животных (пойкилотермных).

Температура тела у большинства теплокровных лежит в диапазоне 36-39 °С, несмотря на значительные различия в массе и размерах.

Интенсивность метаболизма находится в зависимости от массы тела. Потери тепла на единицу массы тем больше, чем больше соотношение между поверхностью и объемом тела, причем это соотношение уменьшается с увеличением размера тела. Кроме того, у мелких животных изолирующий слой тела более тонкий. Для компенсации большой потери теплоты мелким животным требуется повышение метаболизма и потребление ими относительно большого количества пищи. Этим объясняется прожорливость грызунов, мелких птиц и др.

### III. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Электрические явления играют исключительно важную роль в живом организме. Какой бы элемент тела животного или птицы, насекомого или растения мы не взяли, будь это клетка, ткань или отдельный орган, электрические явления тесно связаны с функциональными особенностями этого элемента. Электрические явления возникают в момент образования биологической системы, сопутствуют ей в течение времени ее существования и исчезают вместе с ее гибелью.

*Электродинамика – раздел физики, изучающий электрические и магнитные явления, как в физических объектах, так и в биологических средах.*

При этом учитывается, что электрические и магнитные явления связаны с особой формой существования материи – электрическими и магнитными полями и их взаимодействием. Эти поля настолько взаимосвязаны, что принято говорить о едином электромагнитном поле.

#### Тема № 8. Электростатика. Электрические явления в биологических системах

##### 8.1. Постоянное электрическое поле и его характеристики

*Электростатика – раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов и их свойства.*

Самое простое и повседневное явление, в котором обнаруживается факт существования в природе электрических зарядов, – это электризация (способность тел приобретать заряд) при соприкосновении. Еще в глубокой древности было известно, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие предметы. В конце 16 века английский врач Уильям Гильберт назвал тела, способные после натирания притягивать легкие предметы наэлектризованными.

Способность электрических зарядов, как к взаимному притяжению, так и к взаимному отталкиванию объясняется существованием двух различных видов зарядов. В 1729 году Шарль Дюфе установил, что существует два рода зарядов. Один образуется при трении стекла о шелк, а другой – смолы о шерсть. Поэтому Дюфе назвал заряды «стеклянным» и «смоляным». Дюфе установил, что разноименно заряженные тела притягиваются, а одноименно заряженные – отталкиваются друг от друга.

Понятие о положительном и отрицательном заряде ввел Бенджамин Франклин.

*Электрический заряд – физическая скалярная величина, определяющая способность тел участвовать в электромагнитных взаимодействиях.*

Впервые понятие электрического заряда было введено французским физиком и инженером Ш. О. Кулоном в 1785 году.

Единица измерения заряда в системе СИ является **Кл (Кулон)** – заряд или количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника за время 1с при токе силой 1А:

$$[q] = A \cdot c = \text{Кл}$$

**Элементарным электрическим зарядом** называется заряд, который по модулю равен заряду электрона:

$$q = |e| = | -1,6 \cdot 10^{-19} | \text{ Кл}$$

В явлениях, где участвуют электрически заряженные тела и частицы, соблюдается **закон сохранения электрических зарядов**: электрические заряды не создаются и не исчезают, а только передаются от одного тела к другому или перераспределяются внутри данного тела.

Заряд не является самостоятельной сущностью, не зависимой от материи, он – одно из свойств материи.

Первые количественные исследования по электростатике были выполнены в 1785 году Ш. О. Кулоном, который установил **закон Кулона**:

*сила, с которой взаимодействуют два неподвижных точечных заряда, прямо пропорциональна произведению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:*

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (8.1)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – **электрическая постоянная** (диэлектрическая проницаемость вакуума);

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, для воздуха равна 1;

$q_1$  и  $q_2$  – заряды;

$r$  – расстояние между центрами зарядов.

Электрические заряды, находясь на расстоянии, друг от друга, взаимодействуют между собой через пространство. Такое взаимодействие может осуществляется только посредством поля, в данном случае – электрического.

**Электрическое поле** – особый вид материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрических зарядов или осуществляется силовое воздействие на электрические заряды, находящиеся в этом поле.

#### **Характеристики электрического поля:**

**Напряженность  $\vec{E}$**  – векторная физическая величина, численно равная силе, с которой электрическое поле действует на единичный положительный заряд, внесенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (8.2)$$

Из этого определения видно, почему напряженность электрического поля иногда называется силовой характеристикой электрического поля.

Единицей измерения напряженности в системе СИ служит **Н/Кл** (**Ньютон на Кулон**) – напряженность такого поля, которое действует на заряд 1Кл с силой 1Н:

$$[E] = \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1} = \text{Н} / \text{Кл}$$

Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей в данной точке поля на положительный точечный заряд.

**Напряженность поля точечного заряда в скалярной форме** определяется по формуле:

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2}, \quad (8.3)$$

где  $q$  – точечный заряд;

$r$  – расстояние от заряда, создающего поле, до точки, в которой определяется напряженность.

Графически электрическое поле изображается с помощью **силовых линий** – воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности.

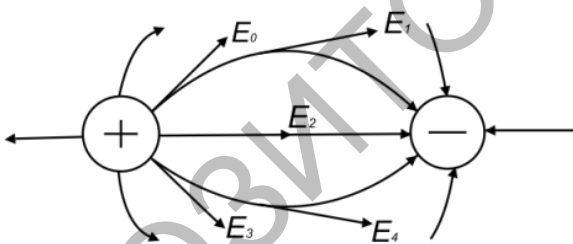


Рисунок 8.1

Силовые линии направлены от положительного заряда к отрицательному заряду, непрерывны и не пересекаются между собой (рисунок 8.1).

Если во всех точках электрического поля напряженность одинакова, то поле называется **однородным**. В

противном случае поле называется **неоднородным**.

**Потенциал  $\phi$**  – энергетическая характеристика электрического поля.

**Потенциал** – скалярная физическая величина, численно равная работе, которую совершают силы поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность или в точку, где потенциал поля принимается равным нулю:

$$\phi = \frac{A_{1\infty}}{q_0} \quad (8.4)$$

Потенциал не зависит от перемещаемого заряда и поэтому может служить характеристикой электрического поля.

**Потенциал** – скалярная физическая величина, численно равная потенциальной энергии, которой обладает единичный положительный заряд, внесенный в данную точку поля:

$$\varphi = \frac{W_{II}}{q} \quad (8.5)$$

Потенциал любой точки электрического поля точечного заряда в вакууме определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r} \quad (8.6)$$

На практике чаще используют понятие **разности потенциалов** ( $\Delta\varphi$ ) между точками электрического поля, которую называют **электрическим напряжением** ( $U$ ):

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$$

**Разность потенциалов (напряжение)** – величина, численно равная работе, которую совершает электрическое поле при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую:

$$\Delta\varphi = U = \frac{A}{q} \quad (8.7)$$

Единицей измерения потенциала и разности потенциалов системе СИ является **В (Вольт)** – вольт является потенциалом такой точки поля, при перемещении из которой заряда  $+1\text{Кл}$  на бесконечность совершается работа  $1\text{Дж}$ :

$$[U] = [\Delta\varphi] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}$$

Так как напряженность и потенциал являются различными характеристиками одной и той же точки электрического поля, то между ними существует связь, которую можно выразить формулой. Так как по формуле

$$(8.7) \quad \Delta\varphi = \frac{A}{q}, \quad \text{но с учетом того, что } A = F \cdot \Delta x, \quad \text{получаем}$$

$$\Delta\varphi = \frac{F \cdot \Delta x}{q} \Rightarrow \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{F}{q}, \quad \text{но так как } \frac{F}{q} = E, \quad \text{имеем:}$$

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = -\text{grad}\varphi, \quad (8.8)$$

где  $\Delta\varphi$  - изменение потенциала;

$\Delta x$  – малый отрезок пути из данной точки, вдоль линии напряженности.

Знак «минус» обусловлен тем, что напряженность электрического поля направлена в сторону убывания потенциала, тогда как градиент потенциала направлен в сторону возрастания потенциала.

**Напряженность электрического поля в любой точке равна по величине и противоположна по направлению градиенту потенциала.**

Формула (8.8) показывает, что единицей измерения напряженности электрического поля является **В/м (Вольт на метр)**:

$$[E] = B / м$$

**Емкость  $C$**  – величина, численно равная заряду, изменяющему потенциал проводника на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (8.9)$$

Емкость характеризует способность тел накапливать заряд и зависит только от формы и размера проводника.

Единицей измерения емкости в системе СИ является  **$\Phi$  (Фарад)** – емкость такого уединенного проводника, на котором заряд  $1\text{Кл}$  создает потенциал  $1\text{В}$ :

$$[C] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \Phi$$

Земля состоит из различных веществ, как проводников, так и диэлектриков, однако при относительно высокой влажности они становятся хорошими проводниками. Заряды, образованные на телах, изолированных от Земли, при электрическом контакте с ней «уходят» в землю и нейтрализуются. Непосредственное соприкосновение или соединение проводником какого-либо тела с землей называется заземлением. Во многих случаях заземление устраивают искусственно: для улучшения контакта с землей в почву укладывают металлические пластины достаточной площади, к которым присоединяют заземленные предметы.

По условиям безопасности требуется заземлять корпуса различных медицинских аппаратов, экранирующие кабины. В некоторых случаях заземление осуществляют путем присоединения тел к трубам водопроводной сети, которая заземлена уже в силу своего устройства.

## 8.2. Биопотенциалы: их природа, классификация. Уравнение Нернста. Равенство Доннана

*Биопотенциал – разность потенциалов, возникающая между различными частями живой ткани или наружной и внутренней средой клетки.*

Биопотенциалы имеют ионную природу. Основным генератором биопотенциалов является клетка.

Биопотенциалы делятся на биопотенциалы покоя и действия.

*Биопотенциалы покоя - возникают в невозбужденной клетке и могут поддерживать свой уровень достаточно долго.*

Биопотенциалы покоя делятся на диффузионные, мембранные и фазовые.

**1. Диффузионные биопотенциалы** возникают на границе двух жидких сред в результате различной подвижности ионов.

Рассмотрим сосуд, разделенный полупроницаемой перегородкой, по обе стороны которой находятся растворы одно и того же электролита, например KCl, разных концентраций. Предположим, что мембрана пропускает ионы одного знака и не пропускает ионы другого знака. Причиной этого может быть сильное различие в эффективных диаметрах ионов, вследствие чего более крупные ионы не проходят через поры мембраны.

В результате диффузии положительно заряженные ионы калия переходят из левой части сосуда, где их концентрация больше, в правую часть, где концентрация меньше. А отрицательные ионы хлора будут оставаться в левой части сосуда.

Этот процесс диффузии будет продолжаться до тех пор, пока возникающее при этом электрическое поле не станет препятствовать дальнейшей диффузии ионов калия. Таким образом, в левой части сосуда будет преобладать избыточный отрицательный заряд, а в правой - положительный. Возникает диффузионная разность потенциалов.

**2. Мембранные биопотенциалы** являются частным случаем диффузных и возникают между внутренней и наружной средой клетки, т.е. по обе стороны мембраны клетки.

В результате действия натрий - калиевого насоса из клетки наружу выводится три иона натрия, а вместо них в клетку поступает два иона калия, в результате чего один положительный ион покидает клетку, что способствует появлению отрицательного потенциала внутриклеточного вещества относительно внеклеточного. Однако концентрация ионов калия внутри клетки очень велика (в 20-40 раз больше, чем во внеклеточной жидкости), и если бы внутри клетки не было анионов, то одного натрий - калиевого насоса было бы недостаточно для обеспечения отрицательного потенциала внутри клетки. В ней содержатся анионы хлора, отрицательно заряженные белковые молекулы, аминокислоты, органические кислоты, фосфаты (соли и эфиры фосфорных кислот) и сульфаты (минералы, соли серной кислоты). Биомембрана в состоянии покоя проницаема в основном

для ионов калия, органические же ионы через мембрану не проходят и остаются внутри клетки.

Величина мембранного биопотенциала определяется по **уравнению Нернста**:

$$\Delta\varphi = -\frac{R \cdot T}{Z \cdot F} \cdot \ln \frac{[K^+]_{\text{вн.}}}{[K^+]_{\text{нар.}}}, \quad (8.10)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – термодинамическая температура;

$Z$  – валентность иона;

$F$  – число Фарадея;

$[K^+]_{\text{нар.}}$  – концентрация ионов калия внутри клетки;

$[K^+]_{\text{вн.}}$  – концентрация ионов калия снаружи клетки.

Знак минус показывает, что внутренняя поверхность мембраны заряжена отрицательно, а наружная - положительно.

Для определения концентрации ионов калия и хлора в стационарном состоянии используется **равенство Доннана**: *произведение концентрации отрицательных и положительных ионов внутри клетки равно произведению концентрации отрицательных и положительных ионов снаружи клетки*:

$$\frac{[K^+]_{\text{вн.}}}{[K^+]_{\text{нар.}}} = \frac{[Cl^-]_{\text{нар.}}}{[Cl^-]_{\text{вн.}}}, \quad [K^+]_{\text{вн.}} \cdot [Cl^-]_{\text{вн.}} = [K^+]_{\text{нар.}} \cdot [Cl^-]_{\text{нар.}} \quad (8.11)$$

В соответствии с формулой (8.11) величину мембранного потенциала клетки можно вычислить по отношению концентраций ионов хлора:

$$\Delta\varphi = -\frac{R \cdot T}{Z \cdot F} \cdot \ln \frac{[Cl^-]_{\text{нар.}}}{[Cl^-]_{\text{вн.}}} \quad (8.12)$$

**3. Фазовый биопотенциал** возникает на границе раздела двух фаз или двух несмешивающихся жидкостей.

Например, масло и электролит.

**Биопотенциалы действия** – разность потенциалов, характеризующаяся изменением концентрации ионов внутри и снаружи клетки, что вызывает изменение величины и знака потенциалов.



При раздражении клетки каким-либо фактором (тепловое, механическое или электрическое

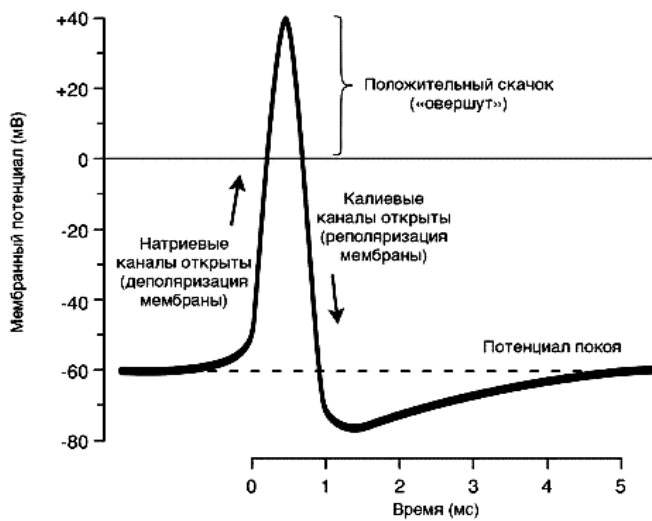


Рисунок 8.2

мембраны. Количество натриевых каналов в мембране клетки в 10 раз больше, чем калиевых. В результате раздражения проницаемость мембраны для натрия увеличивается примерно в 500 раз и превышает ее проницаемость для ионов калия в 20-30 раз. Большинство каналов ионспецифичны — натриевый канал пропускает практически только ионы натрия и не пропускает другие (это явление называют селективностью). Мембрана клеток возбудимых тканей (нервной и мышечной) содержит большое количество потенциалзависимых ионных каналов, способных быстро реагировать на смещение мембранного потенциала. Движущая сила в данном случае обеспечивается градиентом концентрации (с внешней стороны мембраны находится намного больше положительно заряженных ионов натрия, чем внутри клетки) и отрицательным зарядом внутренней стороны мембраны (рисунок 8.2).

Поэтому при раздражении клетки внутрь клетки из внешней среды устремляется поток положительно заряженных ионов натрия и в результате внутренняя поверхность мембраны заряжается положительно, а наружная - отрицательно.

Величину мембранного потенциала, обусловленного ионами натрия, можно найти по формуле:

$$\Delta\varphi_{Na} = \frac{R \cdot T}{Z \cdot F} \cdot \ln \frac{[Na^+]_{нар.}}{[Na^+]_{вн.}} \quad (8.13)$$

Общее изменение биопотенциала при возбуждении дает значение **биопотенциала действия**:

$$\Delta\varphi_D = |\Delta\varphi| + \Delta\varphi_{Na} \quad (8.14)$$

Например, в гигантском аксоне кальмара потенциал покоя равен – 60 мВ. При возбуждении максимум потенциала действия достигает +35 мВ. Полное изменение потенциала, или потенциал действия, составляет в данной среде 95 мВ.

Натриевый канал открывается на очень малый промежуток времени от **0,5 до 1мс**, после чего проводимость для ионов натрия снова понижается, что приводит к восстановлению потенциала покоя в данном месте аксона (цилиндрическое тело, боковая поверхность которого образована мембраной, отделяющей внутриклеточное вещество от внеклеточного). В то же время потенциал действия вызывает раздражение соседнего участка аксона, в котором описанный процесс повторяется.

Измерение биопотенциалов клеток и тканей имеет важное диагностическое значение для биофизики и клинической ветеринарии. На роль биопотенциалов указывал еще в начале XX века К. А. Тимирязев.

Для измерения разности потенциалов между внешней и внутренней частями клетки необходимы тончайшие электроды, которые могут проникать внутрь клетки, причиняя ей минимальные повреждения. Кроме того, электроды должны быть неполяризуемыми, так как ЭДС поляризации, возникающая при взаимодействии металла с электролитом, может оказаться значительно больше величин биопотенциалов и до неузнаваемости исказить результаты измерений. Введение микроэлектрода в клетку производят специальным манипулятором. Второй микроэлектрод или прижимают к внешней поверхности клетки, или помещают во внеклеточную среду. Измерение биопотенциалов путем вживления электродов в соответствующие органы проводят на лабораторных опытах с животными. В клинической практике измеряют напряжение, которое биопотенциалы создают на поверхности тела человека или животных.

В медицине и ветеринарии широко применяются с диагностическими целями методы регистрации биопотенциалов **сердца** (электрокардиография, или ЭКГ); **головного мозга** (электроэнцефалография, или ЭЭГ), **мышц** (электромиография, или ЭМГ); **моторной деятельности желудка** (электрогастрография или ЭНГ); **сетчатки глаза** (электроретинография, или ЭРГ).

При электроэнцефалографии измеряется суммарный потенциал действия, обусловленный работой нейронов головного мозга и его реакций при действии раздражителей. Электроды накладываются на поверхность черепа, и измеряемые при этом напряжения значительно меньше, чем при ЭКГ, вследствие малой проводимости костной ткани. ЭЭГ широко используется в клинической практике для диагностики заболеваний головного мозга (опухолей, энцефалита), в лечебной работе (особенно часто при эпилепсии), в анестезиологии.

На измерении биопотенциалов разработана система диагностики мастита коров по данным уровня биопотенциала точек (БАТ) на коже животного.

Величины биопотенциалов невелики, не превышают десятка милливольт, и только у некоторых представителей акул и костистых рыб имеются специальные электрические органы, создающие напряжение до сотен вольт. О существовании электрических рыб (угри, скаты) было известно еще в древности; имеются сведения, что древние римляне применяли электрические разряды скатов для лечения нервных заболеваний. Установлено, что более 300 видов рыб имеют электрические органы. Некоторые рыбы используют их для поражения своих жертв, другие, число которых значительно больше, испускают слабые импульсы для локации, что особенно необходимо в глубинах океана, куда не проникает солнечный свет. Так как морская вода обладает хорошей электропроводностью, то даже слабые электрические сигналы от объектов добычи «улавливаются» хищниками на значительных расстояниях. Акулы, миноги, некоторые сомообразные используют электричество для поиска добычи. Находящиеся в воде предметы искажают электрическое поле. По этим искажениям рыбы легко ориентируются в мутной воде. Акулы реагируют на электрическое поле напряженностью всего 0,01 мкВ/см. Поэтому они способны обнаруживать жертву по электрическим полям, создаваемым работой дыхательных мышц и сердца. Есть предположения, что электрорецепторы они используются акулой и в качестве термодатчиков, определяющих температуру среды с точностью до 0,05°C.

Кроме того, мощные кратковременные электрические разряды служат надежным оружием и защитой. Основной электрический орган рыб – видоизмененная мышечная ткань, сильно сплюснутая и получившая название электрической пластинки.

Например, у угря пластинка имеет толщину 10 мкм и длину до 10 мм. Небольшое напряжение одной пластинки увеличивается путем последовательного соединения их друг с другом в столбики, как в обычной электрической батарее. У электрического угря, обитающего в Южной Америке, насчитывается до 800 пластинок, отделенных друг от друга студенистым веществом. К каждой пластинке подходит нерв от спинного мозга. Угорь накапливает электрический заряд и в нужный момент разряжает батарею через тело жертвы, создавая напряжение до 500 В при пиковой силе тока в сотни миллиампер. Электрические органы угря занимают более 2/3 длины его тела. Положительный заряд находится в передней части тела, отрицательный — в задней. Есть так же дополнительный электрический орган, который играет роль локатора. Большая электропроводность воды позволяет этим рыбам атаковать на расстоянии. Например, электрический угорь способен парализовать своим разрядом такое крупное животное, как корова или лошадь.

Электрический сом может создавать электрический разряд напряжением до 350 В. При этом электрические органы сома расположены по всей поверхности тела, непосредственно под кожей и составляют 1/4 массы его тела.

### 8.3. Электрический диполь. Сердце как электрический диполь. Физические основы электрокардиографии

*Диполь* – система, состоящая из двух зарядов одинаковых по величине и противоположных по знаку, находящихся на некотором расстоянии друг от друга (рисунок 8.3).

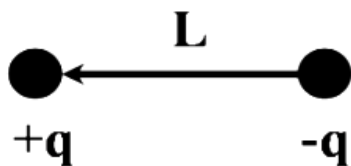


Рисунок 8.3

Основной характеристикой диполя является *дипольный момент*  $\vec{P}$  – векторная физическая величина, численно равная произведению абсолютной величины заряда на плечо диполя и направленный от отрицательного заряда к положительному:

$$\vec{P} = |q| \cdot L, \quad (8.15)$$

где  $q$  – суммарная величина положительных (или равных им отрицательных) зарядов диполя;

$L$  – расстояние между центрами тяжести положительных и отрицательных зарядов.

Единицей дипольного момента в системе СИ является *Кл·м (Кулон на метр)*:

$$[P] = \text{Кл} \cdot \text{м}$$

Диполем могут быть полярные молекулы белков, если центры положительного и отрицательного зарядов находятся на некотором расстоянии.

Диполями бывают молекулы аминокислот, а также воды (рисунок 8.4) и других веществ, входящих в состав тканей организма человека и животных.

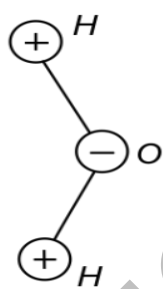


Рисунок 8.4

В сложных белковых молекулах каждая связь может иметь свой дипольный момент. Поэтому дипольный момент сложной молекулы будет равен сумме дипольных моментов отдельных связей:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i \quad (8.16)$$

При помещении диполя в постоянное электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$  (рисунок 8.5) на диполь будут действовать две равные и противоположно направленные силы:  $F_+ = q_+ \cdot E$  и  $F_- = q_- \cdot E$ , стремящиеся установить диполь по направлению силовых линий поля.

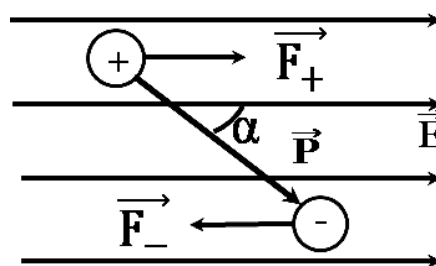


Рисунок 8.5

Явление ориентации диполей по электрическому полю получило название **поляризации**.

Момент пары сил равен:

$$M = F \cdot L \cdot \sin \alpha = q \cdot L \cdot E \sin \alpha$$

В векторной форме получаем:

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (8.17)$$

Если диполи поместить в переменное электрическое поле, то они будут поворачиваться около положения равновесия в такт изменениям поля. На такие повороты диполей будет затрачиваться определенная энергия или мощность переменного электрического поля, которая будет выделяться в виде тепла внутри среды тканей организма, состоящей из диполей. Это явление нашло применение в физиотерапии УВЧ полем.

Рассмотрим подробно физические основы электрокардиографии. Возбужденная клетка, которую можно уподобить диполю, при возбуждении генерирует потенциал действия. В возбужденном миокарде всегда имеется много диполей, поэтому потенциал электрического поля сердца складывается из дипольных потенциалов элементарных диполей.

Экспериментально установлено, что в состоянии покоя цитоплазма

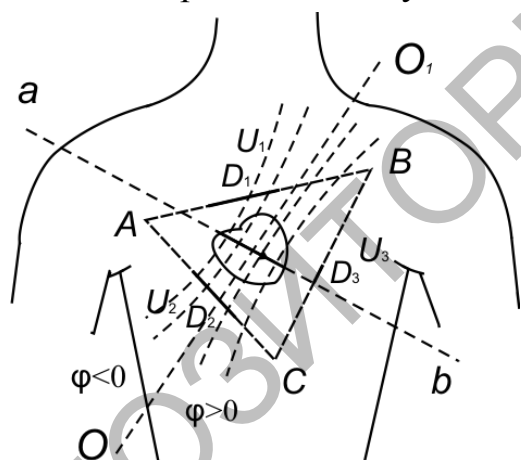


Рисунок 8.6

мышечных клеток сердца заряжена отрицательно по отношению к внешней их поверхности, поэтому поверхность клетки оказывается поляризованной. Величина этого мембранного потенциала составляет 80-90 мВ. При возбуждении сердечной мышцы возникает потенциал действия, с амплитудой на 30-50 мВ превышающей потенциал покоя, которые на поверхности кожи человека и животных дают линии разных потенциалов (эквивалентные поверхности).

Дипольные представления о сердце лежат в основе теории отведений Эйнтховена. На поверхности грудной клетки он определил три точки А, В, С (рисунок 8.6), соединив которые можно получить равносторонний треугольник (треугольник Эйнтховена), в центре которого находится сердце-диполь, генерирующий потенциалы действия.

При снятии ЭКГ электроды располагаются не в вершинах А, В, С, а на правой руке (ПР), левой руке (ЛР), левой ноге (ЛН). По терминологии физиологов, разность потенциалов, регистрируемая между двумя точками тела, называется **отведениями** ( $U_1, U_2, U_3$ ). Различают I отведение  $U_1 \rightarrow$

(ПР – ЛР); II отведение  $U_2 \rightarrow$  (ПР – ЛН) и III –  $U_3 \rightarrow$  (ЛР – ЛН). Так как электрический момент диполя-сердца изменяется со временем, то в отведениях будут получены временные зависимости разности потенциалов, которые и называются **электрокардиограммой**. Нормальная электрокардиограмма коровы приведена на рисунке 8.7.

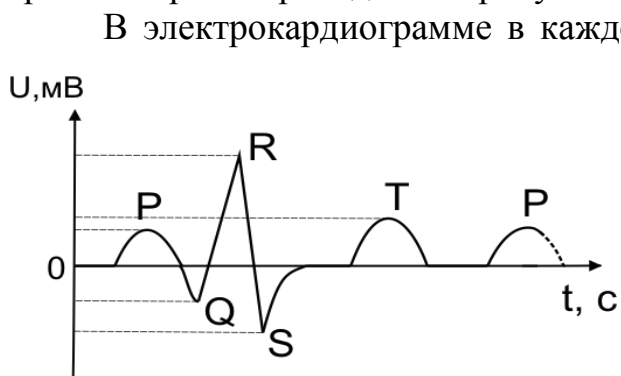


Рисунок 8.7

В электрокардиограмме в каждом сердечном цикле различают зубцы: P, Q, R, S, T. Зубец P отражает возбуждение предсердий, которое представляет собой алгебраическую сумму биопотенциалов, возникающих при возбуждении правого и левого предсердий. Комплект зубцов QRS отражает электрические изменения в возбужденных желудочках.

Зубцы Q, R, S характеризуют нормальную часть возбуждения желудочков, а зубец T – конечную его часть. Интервал от начала зубца P до начала зубца Q показывает время, необходимое для проведения возбуждения по проводящей системе, то есть от предсердий до желудочков. При патологии форма зубцов, их величина изменяются, что позволяет использовать ЭКГ для диагностики.

#### 8.4. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков

*Диэлектрики – вещества, не проводящие ток, т.е. не имеющие свободных электрических зарядов.*

Однако при изменении внешних условий (нагревание, облучение) диэлектрики могут проводить электрический ток.

Условно можно выделить три класса диэлектриков:

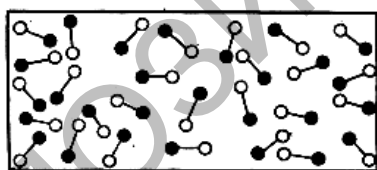


Рисунок 8.8

##### ■ с полярными молекулами

Молекулы этих диэлектриков обладают электрической асимметрией, то есть «центры масс» их положительных и отрицательных зарядов не совпадают (рисунок 8.8). Следовательно, они представляют собой диполи, даже в отсутствие внешнего электрического поля.

Вследствие беспорядочного теплового движения дипольные моменты полярных молекул ориентированы хаотически и векторная сумма всех дипольных моментов в диэлектрике равна нулю.

К диэлектрикам с полярными молекулами относятся вода, нитробензол, спирты, щелочи, кислоты, белки и другие биополимеры.

##### ■ с неполярными молекулами

Отдельные атомы не обладают дипольными моментами. Отсутствуют они и у некоторых молекул, в которых заряды атомных электронов и

ядер расположены так, что «центры масс» положительных и отрицательных зарядов совпадают.

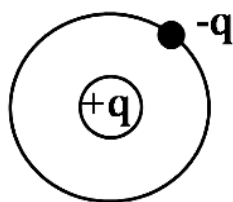


Рисунок 8.9

Схематически неполярная молекула диэлектрика может быть представлена в виде положительно заряженной области (ядро атома), симметрично окруженной отрицательно заряженной оболочкой (рисунок 8.9).

К диэлектрикам с неполярными молекулами относятся водород, кислород, азот, углеводы и т.д.

### ■ кристаллические диэлектрики

К ним относятся вещества, имеющие ионную структуру. Их решетка состоит из положительных и отрицательных ионов. Такой диэлектрик схематически можно рассматривать как совокупность двух подрешеток, одна из которых заряжена положительно, а другая – отрицательно (рисунок 8.10). При отсутствии внешнего электрического поля подрешетки расположены симметрично и суммарный электрический момент равен нулю.

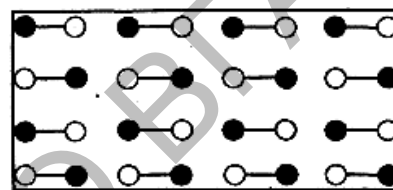


Рисунок 8.10

Примером является каменная соль, кварц, слюда, корунд и др.

При помещении диэлектрика в электрическое поле возникает особое состояние вещества, которое носит название **поляризации** – явление возникновения в диэлектрике собственного электрического поля при внесении его во внешнее электрическое поле, обусловленное смещением связанных заряженных частиц, входящих в состав атомов или молекул диэлектрика.

Диэлектрик, в котором возникло такое поле, называется поляризованным.

Различают три вида поляризации диэлектриков:

### ■ ориентационная, или дипольная поляризация

Она характерна для диэлектриков с полярными молекулами. Если

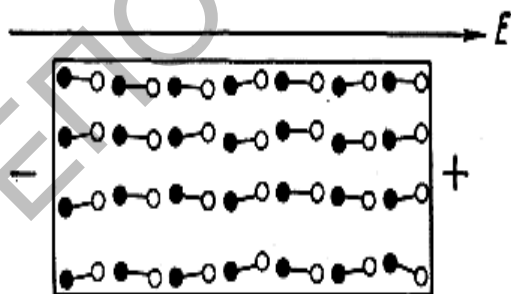


Рисунок 8.11

поместить такой диэлектрик в электрическое поле с напряженностью, то молекулярные диполи будут поворачиваться, стремясь установиться вдоль вектора напряженности поля (рисунок 8.11). В результате диэлектрик поляризуется. Степень поляризации диэлектрика возрастает с увеличением напряженности электрического поля и убывает при повышении температуры.

### ■ электронная поляризация

Она возникает у диэлектриков с неполярными молекулами. Под действием внешнего поля положительный заряд смещается в направлении вектора напряженности поля, а электронная оболочка вытягивается в противоположную сторону (рисунок 8.12). При этом электрическая симметрия нарушается и как сами молекулы, так и образованное ими тело приобретает дипольный момент, то есть диэлектрик поляризуется.

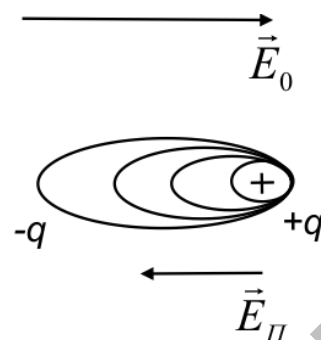


Рисунок 8.12

### ■ ионная поляризация

Возникает в кристаллических диэлектриках с кубическими ионными решетками. Под действием поля положительные ионы смещаются в направлении вектора напряженности, а отрицательные – в противоположную сторону (рисунок 8.13), вследствие чего происходит поляризация диэлектрика.

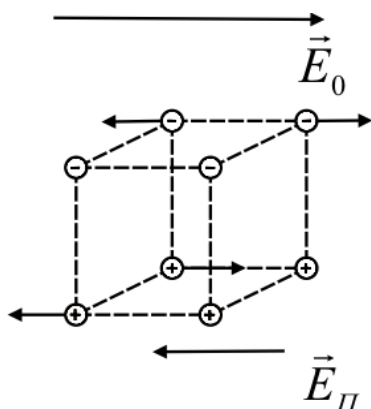


Рисунок 8.13

Биологические ткани представляют собой растворы электролитов, содержащие полярные белковые молекулы, а также диэлектрики (костная ткань, мембраны клеток).

Под действием внешнего электрического поля в *тканях организма*

*возникают следующие виды поляризации:*

**Электролитическая поляризация** - образование у электродов двойного электрического слоя: в области катода концентрация положительных ионов в слое увеличивается, а в области анода уменьшается. Это приводит к появлению в межэлектродном пространстве электрического поля, направленного против внешнего, то есть происходит поляризация вещества между электродами.

**Поверхностная поляризация** происходит в растворах электролитов на телах, поверхности которых обладают связанными электрическими зарядами, например, биомембраны. К ним притягиваются из раствора ионы, образующие двойной электрический слой. В результате во внешнем электрическом поле происходит перераспределение ионов в двойном слое, то есть явление поляризации.

**Макроструктурная поляризация** возникает в растворах электролитов, на объектах, обладающих значительной электрической неоднородностью, например, на клетках или органеллах. Положительные и отрицательные ионы, перемещаясь под действием внешнего электрического поля в противоположных направлениях, как в цитоплазме, так и во внеклеточной среде, доходят до поверхности мембраны и скапливаются около нее, поскольку мембрана не пропускает многие ионы через себя. В результате клетка и ее органеллы приобретают дипольный момент.



Клеточная мембрана, разделяющая электрические заряды противоположных знаков, представляет собой конденсатор, емкость которого определяется поляризационными эффектами. Величина поляризационной емкости, измеренная на постоянном поле, достигает от 0,1 до 10 мкФ на 1 см<sup>2</sup> поверхности мембраны неповрежденной клетки.

Таким образом, при поляризации любого диэлектрика молекула принимает дипольную структуру и, поляризуясь, любой диэлектрик создает собственное электрическое поле, направленное против внешнего поля, которое значительно уменьшает величину внешнего поля, тем самым обуславливая высокое удельное сопротивление тканей постоянному току.

Согласно ионной теории возбуждения П.П. Лазарева, поляризация клетки приводит к ряду специфических физико-химических процессов, которые под катодом и анодом протекают различно. Легкие и подвижные ионы калия и натрия, скапливаясь у катода, разрыхляют мембрану клетки, повышают ее проницаемость; более тяжелые и медленные ионы кальция и магния скапливаются у анода, уплотняют мембрану и уменьшают ее проницаемость. Изменение концентрации ионов вызывает изменение функционального состояния клеток: повышение возбудимости у катода и понижение у анода. Сдвиги в кислотно-щелочном равновесии оказывают влияние на действие ферментов и обменные процессы в клетках (водно-солевой, белковый и др.).

Степень уменьшения напряженности электрического поля в диэлектрике, по сравнению с напряженностью электрического поля в вакууме, определяется *относительной диэлектрической проницаемостью вещества*  $\epsilon$  - это величина, которая показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в вакууме больше, чем напряженность электрического поля в диэлектрике:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} = \frac{E_0}{E_0 - E_{св.}} \quad (8.18)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость зависит от природы диэлектрика и температуры (особенно для жидких диэлектриков). С увеличением температуры вязкость уменьшается, сопротивление среды смещению зарядов уменьшается, и количество связанных зарядов на поверхности увеличивается, что ведет к увеличению диэлектрической проницаемости.

Величина диэлектрической проницаемости для газов близка к единице (от 1,0001 до 1,01), для неполярных жидкостей она находится в пределах от 2 до 2,5, для жидкостей с полярными молекулами – от 10 до 81 и для твердых диэлектриков - от 2 до 8. Для биологических тканей значения диэлектрической проницаемости велики, например, для белого вещества мозга она равна 90, для серого вещества мозга – 85, вещества зрительного нерва – 89, белка – 70–75, плазмы крови – 70, крови – 85.

Диэлектрические свойства живых тканей определяются биоструктурами. Дипольные моменты молекул изменяются при любой даже самой незначительной перестройке структуры вещества, поэтому исследование динамики диэлектрической проницаемости дает возможность обнаружить тонкие изменения, незаметные даже в электронный микроскоп, происходящие на молекулярном уровне.

Диэлектрическая проницаемость вещества зависит как от электрических свойств атомов и молекул (например, дипольного момента), так и от их взаимного расположения, то есть строения веществ. Поэтому определение диэлектрической проницаемости или ее измерение в тех или иных условиях является одним из распространенных методов исследования структуры вещества, в частности и различных тканей организма. Наиболее ценные данные в этом отношении дает исследование диэлектрической проницаемости в переменном (высокочастотном) электрическом поле.

### **8.5. Биологическое действие статического электрического поля**

Все живые существа на Земле находятся под действием слабого статического электрического поля, создаваемого избыточным отрицательным зарядом нашей планеты. В среднем величина напряженности поля у поверхности Земли равна примерно 150 В/м, но при грозах эта величина может быть в сотни раз выше. Таким образом, эволюция живых существ происходила под действием относительно слабых геоэлектрических полей. Начиная со второй половины 20 века, в связи с введением в эксплуатацию высоковольтных линий электропередач люди и животные все больше подвергаются воздействию электростатических полей высокой напряженности.

Физическая сторона действия статического электрического поля на организм сводится к поляризации, как отдельных молекул, так и тканей, к индицированию на поверхности тела электрических зарядов, а в проводящих тканях — возникновению микротоков. Поля высокой напряженности могут приводить к разделению цепей в молекулах ДНК, что вызывает разделение хромосом. Под действием слабых токов, возникающих в тканях, происходит усиление тормозных процессов в коре и подкорковых центрах, и как следствие происходит снижение артериального давления, урывается частота дыхания и увеличивается его глубина.

Электрическое поле при местном воздействии снижает возбудимость и проводимость свободных нервных окончаний кожи и слизистых оболочек. С учетом того, что части этих волокон являются проводниками болевой чувствительности, изменение их функциональных свойств приводит к уменьшению чувства зуда. Характер ответной реакции зависит от места и площади воздействия. Кратковременный спазм капилляров и артериол (1-1,5 мин) сменяется последующим их продолжительным расширением. Усиление местного кровотока и активизация трофических и репаративных

процессов в тканях приводит к восстановлению термической чувствительности кожи.

Возможны и другие механизмы действия поля, однако их изучение осложняется тем, что электрическое поле создает вокруг находящегося в нем тела поток аэронов, которые, раздражая нервные окончания в кожных покровах, являются сильными биологическими стимуляторами, маскирующими непосредственное действие слабого статического поля.



**Рисунок 8.14**

Начало применения статического электричества с лечебной целью в виде метода франклинизации, или статического душа, относится к 18 веку. Сущность метода в том, что человека или животное помещают на изолирующей подставке между электродами, соединенными с источником постоянного напряжения порядка 40-50 кВ. Один электрод в форме звезды, на лучах которой имеются небольшие острия, направленные к больному, располагают над головой на расстоянии 10-15 см (рисунок 8.14). Другой электрод в форме металлического листа - под его ногами на изолированной подставке. Под действием электрического поля в тканях-диэлектриках происходит поляризация, в проводящих тканях возникают микротоки, а на поверхности тела образуются статические заряды.

Франклинизация применяется для лечения некоторых нервных заболеваний, бронхоспазмов, кожного зуда, трофических язв, длительно незаживающих ран, ожогов, переутомлений.

Однако, несмотря на почти трехвековое применение статического электричества в медицине, до сих пор имеется много неясного в механизме его биологического действия и в том, какие именно биологические эффекты оно вызывает.

## Тема №9. Постоянный ток и его действие на биологические системы

### 9.1. Постоянный электрический ток и его характеристики. Законы Ома

*Электрический ток – направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц.*

Движение заряженных частиц внутри проводника нельзя наблюдать непосредственно, но судить о наличии электрического тока можно по его действиям:

- *тепловому* – проводник, по которому проходит ток, нагревается;
- *химическому* – изменяется химический состав проводника;
- *магнитному* – в окружающем проводник пространстве возникает магнитное поле;
- *световому* – прохождение тока в газах вызывает их свечение.

Вещества, которые имеют свободные носители зарядов, называются **проводниками**.

По химическому действию электрического тока на проводники они делятся на два класса. Проводники первого класса – те, проходя через которые ток не вызывает химических действий (металлы, уголь). Ко второму классу относятся проводники, при прохождении через которые электрического тока изменяется их химический состав (электролиты).

По типу носителей тока проводники разделяются на три рода. К проводникам первого рода относятся металлы, основными носителями заряда в которых являются электроны. К проводникам второго рода относятся электролиты, основными носителями заряда в которых являются положительные и отрицательные ионы. К проводникам третьего рода относятся ионизированные газы, носителями тока в которых являются электроны и ионы.

За направление электрического тока принимается направление движения положительных зарядов.

#### Характеристики электрического тока:

**1. Сила тока** – физическая скалярная величина, численно равная заряду, прошедшему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{\Delta t} \quad (9.1)$$

Единицей измерения силы тока в системе Си является **A (Ампер)**:

$$[I] = Кл/с = А$$

**Ток называется постоянным**, если сила тока и направление не изменяются с течением времени.

Определим, от чего зависит сила тока в проводнике. Для этого рассмотрим отрезок проводника цилиндрической формы и найдем силу тока в нем:  $I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{e \cdot N}{\Delta t}$ . Так как  $N = n_0 \cdot V$  - это количество заряженных частиц

в проводнике, то получаем:  $I = \frac{e \cdot n_0 \cdot V}{\Delta t} = \frac{e \cdot n_0 \cdot S \cdot l}{\Delta t}$

С учетом, того что  $\frac{l}{\Delta t} = v$ , получаем, что **сила тока в проводнике** равна:

$$I = e \cdot n_0 \cdot S \cdot v, \quad (9.2)$$

$e$  – заряд электрона;

$n_0$  – концентрация электронов или число электронов в единице объема;

$S$  – поперечное сечение проводника;

$v$  – скорость дрейфа электронов, т.е. скорость направленного движения электронов.

*Сила тока в проводнике пропорциональна концентрации свободных электронов, площади поперечного сечения проводника и скорости дрейфа электронов.*

**2. Плотность тока** – величина, численно равная силе тока, прошедшего через единичное поперечное сечение проводника:

$$i = \frac{I}{S} \quad (9.3)$$

Единицей измерения плотности тока в системе СИ является  $A/m^2$  (**Ампер на метр квадратный**):

$$[i] = A/m^2$$

Определим плотность тока в проводнике:

$$i = \frac{I}{S} = \frac{e \cdot n_0 \cdot S \cdot v}{S} = e \cdot n_0 \cdot v \quad (9.4)$$

**3. Сопротивление** - скалярная физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать направленному движению зарядов.

Сопротивление зависит от материала, из которого изготовлен проводник, геометрических размеров проводника и температуры и определяется по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (9.5)$$

где  $R$  – сопротивление;  
 $\rho$  – удельное сопротивление;  
 $l$  – длина проводника;  
 $S$  – площадь поперечного сечения.

Единицей измерения сопротивления в системе СИ является **Ом**:

$$[R] = B/A = \text{Ом}$$

Зависимость сопротивления металлов от температуры выражается формулой:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (9.6)$$

$R_0$  – сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  
 $t$  – температура по Цельсию.

Таким образом, при увеличении температуры сопротивление проводника увеличивается, так как увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки.

**4. Электропроводность** – физическая величина, характеризующая способность тела проводить электрический ток и обратная электрическому сопротивлению:

$$K = \frac{1}{R} \quad (9.7)$$

Единицей измерения электропроводности в системе СИ является **См** (**Сименс**):

$$[K] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См}$$

**5. Величина, обратная удельному сопротивлению**, называется **удельной электропроводностью**:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (9.8)$$

Единицей измерения удельной электропроводности в системе СИ является **См/м** (**Сименс на метр**):

$$[\gamma] = \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} = \text{См/м}$$

## Законы Ома

### 1. Закон Ома для участка цепи (рисунок 9.1)

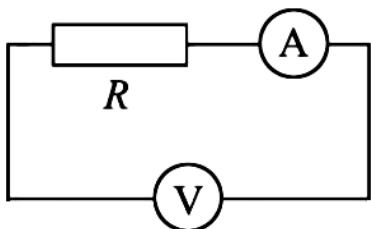


Рисунок 9.1

Сила тока на участке цепи (часть цепи, не имеющей источник тока) прямо пропорциональна падению напряжения на концах этого участка и обратно пропорциональна сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (9.9)$$

где  $U$  – напряжение на концах участка;  
 $R$  – сопротивление.

### 2. Закон Ома для замкнутой цепи (рисунок 9.2)

Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивления:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}, \quad (9.10)$$

где  $\varepsilon$  – электродвижущая сила источника;  
 $R$  – внешнее сопротивление;  
 $r$  – внутреннее сопротивление.

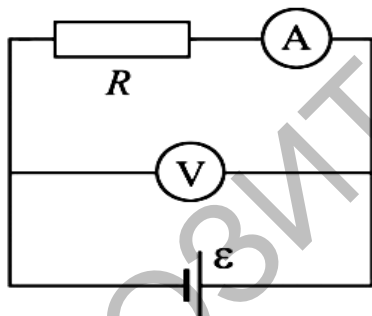


Рисунок 9.2

**Электродвижущая сила источника (ЭДС источника)** – величина, численно равная работе сторонних сил (сил неэлектрической природы) по разделению и перемещению единичного положительного заряда вдоль цепи:

$$\varepsilon = \frac{A_{ст.}}{q} \quad (9.11)$$

Единицей измерения ЭДС в системе СИ является  **$V$  (Вольт)**:

$$[\varepsilon] = V$$

### 3. Закон Ома в дифференциальной форме или для точки проводника

Выведем формулу закона Ома для точки проводника.

В закон Ома для участка цепи (9.8) подставим выражение сопротивления (9.4) и преобразуем:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\rho \cdot \frac{l}{S}} = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot l} \rightarrow \frac{I}{S} = \frac{U}{l} \cdot \frac{1}{\rho}.$$

Учитывая, что  $\frac{U}{l} = E$ , а  $\frac{1}{\rho} = \gamma$ , получаем:

$$i = \gamma \cdot E \quad (9.12)$$

*Плотность тока в данной точке проводника прямо пропорциональна напряженности электрического поля в данной точке.*

Опыт показывает, что электрический ток всегда вызывает нагревание проводника. Количество теплоты  $Q$ , выделяющееся в проводнике, определяется по **закону Джоуля – Ленца**:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = I \cdot U \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (9.13)$$

## 9.2. Ток в электролитах. Электролиз. Законы Фарадея для электролиза

*Электролиты – растворы солей, кислот и оснований, проводящие электрический ток.*

Основными носителями зарядов в электролитах являются **положительно и отрицательно заряженные ионы (катионы и анионы)**, которые образуются в растворе в результате электролитической диссоциации нейтральных молекул растворенного вещества. Молекулы воды имеют достаточно большой дипольный момент, поэтому вокруг молекул воды существует довольно сильное электрическое поле. Это поле ослабляет силу электростатического взаимодействия ионов в молекулах растворенного вещества. За счет тепловых соударений происходит распад этих молекул на ионы.

Результатом диссоциации является образование сольватов, когда молекулы воды «обволакивают» ионы, образуя вокруг них сольватную оболочку.

Также сольватная оболочка препятствует обратному процессу – восстановлению (рекомбинации) ионов электролита в нейтральные молекулы.

Биологические жидкости являются электролитами, электропроводность которых имеет сходство с электропроводностью металлов: в обоих случаях носители тока образуются независимо от электрического поля. Поэтому для электролитов справедливо выражение (9.4), которое можно представить как суммарную плотность тока положительных и отрицательных ионов с зарядом  $q_0$ :



$$i = i_+ + i_- = q_0 \cdot \alpha \cdot n \cdot (v_+ + v_-), \quad (9.14)$$

где  $i$  – плотность тока в электролитах;

$i_+, i_-$  – плотность тока положительных и отрицательных ионов;

$q_0$  – заряд ионов;

$\alpha$  – коэффициент диссоциации;

$n$  – концентрация молекул электролита;

$v_+, v_-$  – средняя скорость движения положительных и отрицательных ионов.

Заряд ионов определяется выражением:

$$q_0 = e \cdot Z, \quad (9.15)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$Z$  – валентность ионов.

Подставляя формулу (9.14) в выражение (9.13), получаем:

$$i = e \cdot Z \cdot \alpha \cdot n \cdot (v_+ + v_-) \quad (9.16)$$

При отсутствии электрического поля ионы в растворе движутся хаотически. Если в раствор погрузить электроды и создать между ними постоянное электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$ , то ионы приобретают направленное движение, которое приближенно можно считать равномерным.

Катионы будут двигаться по направлению вектора напряженности, а анионы – в противоположную сторону (рисунок 9.3). Таким образом, в жидкости возникнет электрический ток, обусловленный встречным движением разноименных ионов. При этом сила, действующая на ионы со стороны электрического поля (ускоряющая)  $F_{эл.} = e \cdot Z \cdot E$ , будет равна силе сопротивления (сила внутреннего трения жидкости)  $F_c = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ , то есть получаем:

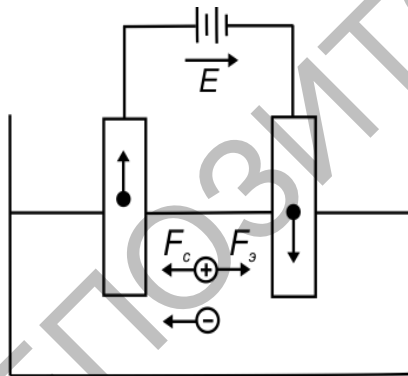


Рисунок 9.3

$$e \cdot Z \cdot E = 4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v,$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;

$\eta$  – коэффициент вязкости жидкости;

$r$  – радиус ионов;

$v$  – скорость дрейфа ионов.

Отсюда получаем:

$$v = \frac{e \cdot Z \cdot E}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

С учетом, что  $\frac{e \cdot Z}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} = b$ , имеем:

$$v = b \cdot E, \quad (9.17)$$

где  $b$  – подвижность ионов.

На величину подвижности влияет электрический заряд иона, поскольку при увеличении заряда растет радиус гидратной оболочки иона и при этом затрудняется его движение между молекулами воды. Поэтому подвижность ионов обратно пропорциональна их валентности.

Учитывая выражение (9.16), плотность тока согласно формуле (9.13) примет вид:

$$i = e \cdot Z \cdot \alpha \cdot n \cdot E \cdot (b_+ + b_-), \quad (9.18)$$

где  $b_+, b_-$  – подвижность положительных и отрицательных ионов.

Сравнивая математическое выражение закона Ома в дифференциальной форме (9.12) и выражение (9.17), получим, что **удельная электропроводность электролитов** имеет вид:

$$\gamma = e \cdot Z \cdot \alpha \cdot n \cdot (b_+ + b_-) \quad (9.19)$$

Таким образом, удельная электропроводность электролитов тем больше, чем больше концентрация ионов, их заряд и подвижность. При повышении температуры подвижность ионов возрастает и увеличивается электропроводность.

**Закон Ома для участка цепи, содержащий электролит**, имеет вид:

$$I = \frac{U - \varepsilon_{пол.}}{R}, \quad (9.20)$$

$\varepsilon_{пол.}$  – ЭДС поляризации, которая направлена против разности потенциалов, создаваемой между электродами внешним источником тока.

**Механизм образования ЭДС поляризации заключается в следующем:**

1. Вокруг электродов, опущенных в электролит, изменяется концентрация ионов. Возле каждого электрода скапливаются заряды противо-

положных знаков, которые создают свое собственное поле, направленное противоположно внешнему полю.

2. На электродах выделяется чистое вещество, которое уменьшает активную поверхность электродов.

3. Подходя к электродам, ионы электролита нейтрализуются и оседают на электродах или выделяются в виде газа.

*Электролиз – процесс выделения чистого вещества на электродах при прохождении постоянного электрического тока через электролит.*

Количественные закономерности электролиза выражаются **законами Фарадея**.

Масса вещества, выделившегося на электродах, определяется выражением:

$$m = m_0 \cdot n,$$

где  $m_0$  – масса иона;

$n$  – число ионов, выделившихся на электродах.

Вследствие выделения вещества на электродах образуется заряд:

$$q = n \cdot e \cdot Z \rightarrow n = \frac{q}{e \cdot Z}.$$

Отсюда получаем:

$$m = \frac{m_0 \cdot q}{e \cdot Z}$$

С учетом того, что

$$k = \frac{m_0}{e \cdot Z} \quad (9.21)$$

Получаем **первый закон Фарадея**:

$$m = k \cdot q \quad (9.22)$$

*Масса вещества, выделившегося на электродах в процессе электролиза, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через электролит.*

Так как  $q = I \cdot \Delta t$ , то **первый закон Фарадея** принимает вид:

$$m = k \cdot I \cdot \Delta t, \quad (9.23)$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент вещества.

*Электрохимический эквивалент вещества – величина, численно равная массе вещества, выделившегося на электродах при прохождении через электролит заряда в 1 Кл:*

$$k = \frac{m}{q} \quad (9.24)$$

Единицей измерения электрохимического эквивалента в системе СИ является *кг/Кл (килограмм на Кулон)*:

$$[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

Выведем второй закон Фарадея. Умножим и разделим выражение (9.21) на постоянную Авогадро:

$$k = \frac{m_0 \cdot N_A}{e \cdot Z \cdot N_A}$$

Учитывая, что  $m_0 \cdot N_A = M$  – молярная масса вещества, получаем:

$$k = \frac{1}{e \cdot N_A} \cdot \frac{M}{Z}$$

Так как  $e \cdot N_A = F$  и  $\frac{M}{Z} = X$  получаем **второй закон Фарадея**:

$$k = \frac{1}{F} \cdot X, \quad (9.25)$$

где  $F = 96500$  Кл/моль – постоянная Фарадея;

$X$  – химический эквивалент вещества.

*Электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален химическому эквиваленту этого вещества.*

Объединив первый и второй законы Фарадея, получим:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{Z} \cdot I \cdot \Delta t \quad (9.26)$$

Формула 9.26 является **объединенным законом Фарадея**.

Определим физический смысл постоянной Фарадея:

$$F = \frac{M \cdot q}{m \cdot Z}$$

Если предположить, что на электродах выделяется 1 моль одновалентного вещества, то есть  $\frac{m}{M} = 1$ , то  $F = q$ .

**Физический смысл постоянной Фарадея** заключается в том, что число Фарадея численно равно заряду, прошедшему через электролит, если на электродах выделяется 1 моль одновалентного вещества.

Электролиз широко используется для получения чистых веществ; создания тонких защитных покрытий (гальваностегия); металлических копий каких-либо предметов (гальванопластика); для химического анализа (электроанализ, полярография).

### 9.3. Биологическое действие постоянного тока. Гальванизация и электрофорез

Действие постоянного тока на организм зависит от силы тока, поэтому весьма существенным фактором является электрическое сопротивление тканей. Электрические свойства тканей неодинаковы. Хорошей электропроводностью по отношению к постоянному току обладают жидкие среды организма – спинномозговая жидкость, кровь, плазма крови, межклеточная жидкость и другие. Плохими проводниками являются роговой слой кожи, связки, сухожилия и особенно костная ткань без надкостницы. Встречая большое сопротивление кожи, энергия постоянного тока частично превращается в тепло и это вызывает активизацию кровообращения и усиление биохимических процессов.

Биологическое действие постоянного тока в значительной степени связано с процессами, происходящими в электролитах, заполняющих клетки и ткани. Постоянный электрический ток, проходя через ткани живого организма, оказывает раздражающее действие, причина которого сводится к поляризационным эффектам, то есть при прохождении постоянного тока происходит разделение, смещение и изменение концентрации ионов околоклеточных мембран, то есть возникает поляризация.

Основным компонентом действия постоянного тока является его влияние на соотношение в тканях различных ионов. Организм человека и животных в значительной степени состоит из биологических жидкостей, содержащих большое количество ионов, которые участвуют в различных обменных процессах. Под влиянием приложенной разности потенциалов в электролите происходит встречное перемещение разноименных заряженных ионов.



Рисунок 9.4

ткань – кожа». Это явление получило название внутритканевой поляризации (рисунок 9.4). На рисунке показана внутритканевая поляризация: а, b – на границе «мяг-

кие ткани – кожа»; с, d – на границе клеточных и других оболочек.

Образуется встречное электрическое поле, называемое поляризационным ( $E_{\Pi}$ ), и возникает внутритканевой поляризационный ток направления, обратного внешнему. С одной стороны, это создает дополнительное сопротивление току, с другой стороны, такие участки внутри тканей являются местами наиболее активного действия тока.

Ток силой около **1 мА**, проходящий через тело человека, вызывает неприятные ощущения, а при силе тока выше **5 мА** возникают болевые ощущения. Ток силой выше **10 мА** вызывает резкое сокращение мышц, при этом может произойти остановка дыхания. При прохождении тока силой выше **70 мА** начинается беспорядочное сокращение мышц сердца (фибрилляция), которая может привести к смерти.

Среди животных очень чувствительны к действию постоянного тока лошади. Так, ток, совершенно безвредный для человека, зачастую оказывается смертельным для лошади.

Если приложить к поверхности тела два электрода, то даже при слабых токах возникает жжение, а при увеличении силы тока на коже появляется ожог. Объясняется это тем, что ионы натрия и хлора, содержащиеся в цитоплазме и в межклеточных жидкостях, в результате вторичных химических реакций на электродах образуют такие веществ, как HCl и NaOH, действие которых на ткани и приводит к ожогу. Для предотвращения этого явления при лечении электрическим током и при биоэлектрических измерениях используют неполяризующиеся электроды, а также между кожей и электродами помещают гидрофильную прокладку, смоченную физиологическим раствором или теплой водой. Этим отделяется процесс электролиза от поверхности тела.

В ветеринарной медицине обычно используют свинцовые электроды, которые легко принимают форму тела и, кроме того, тяжелые ионы свинца обладают малой подвижностью и не проникают в организм.

Однако и при использовании неполяризующихся электродов увеличение силы тока приводит сначала к слабому, а затем и сильному раздражению клеток и тканей. Это ведет к болевым ощущениям, шоку и при определенной величине тока – гибели организма. Причина раздражения клеток сводится к поляризационным эффектам, так как при прохождении тока на противоположных концах клетки скапливаются разноименно заряженные ионы. Возбуждение клетки происходит тогда, когда концентрация ионов на противоположных поверхностях мембраны достигает определенного предельного значения и происходит «пробой» диэлектрической мембраны. Очевидно, этот процесс будет тем более интенсивным, чем больше плотность тока. При небольших значениях плотности тока поляризационные эффекты не ощущаются, так как они компенсируются тепловым хаотическим движением ионов.

Таким образом, раздражение ткани электрическим током имеет определенный порог, ниже которого действие тока живым организмом не ощущается. Значит, для достижения порогового значения необходимо

накопление на мембране определенного электрического заряда и поэтому величина порогового тока должна быть тем больше, чем меньше время действия тока и наоборот.

*Постоянную величину, определяющую минимальную силу тока, вызывающую сокращение (раздражение) мышцы при неограниченном времени воздействия, называют **реобазой** (греч. реос – течение).*

***Хронаксия** (греч. хронос – время, аксио – мера) — минимальное время, требуемое для возбуждения мышечной либо нервной ткани постоянным электрическим током удвоенной пороговой силы, равной двум реобазам.*

Измерение хронаксии – **хронаксиметрия** – применяется для изучения работы нервного и двигательного аппарата человека и животных. Величина хронаксии является показателем скорости возникновения возбуждения и говорит об уровне возбудимости ткани и может служить характеристикой патологического состояния организма.

Для скелетных мышц и нервов млекопитающих хронаксия равна примерно десятичным долям секунды, для гладких мышц – десятым долям секунды. Внешние воздействия могут приводить к изменению хронаксии, что служит показателем определенных физиологических процессов. Например, действие шумов свыше 70 дБ на кур-несушек ведет к изменению хронаксии и одновременно к снижению яйценоскости.

Применение электричества с лечебной целью началось в глубокой древности, когда еще люди не задумывались о сущности происходящих при этом явлений.

Одним из методов электротерапии является гальванизация. Этот метод применяли еще в начале 19 века, когда постоянный ток называли гальваническим.

***Гальванизацией** называют лечебный метод, при котором используется действие на ткани организма постоянного тока до 50 мА, плотностью до 0,1 мА/см<sup>2</sup> при напряжении на электродах 60 – 80 В.*

В зависимости от места приложения электродов раздражение передается от кожи по нервам на тот или иной внутренний орган, в котором происходят изменения его обменных и функциональных свойств. В качестве ответной реакции на раздражение рефлекторно расширяются капилляры, изменяется проницаемость клеточных мембран, электролиз в клетках и тканях приводит к возникновению новых веществ с иной физиологической активностью. Что касается теплового эффекта, то при гальванизации он ничтожно мал.

При помощи гальванизации лечат опухоли от ушибов, фурункулы и другие гнойные заболевания кожи.

Кожа человека и животных в обычных условиях обладает очень малой проницаемостью для ионов. Это обусловлено тем, что поры кожи заполнены воздухом. Крупные органические ионы вообще не могут проникнуть через кожу. В свою очередь стенки кожных пор обладают электрическим зарядом, поэтому при наложении внешнего электрического поля воз-

никает электроосмотическое движение жидкости, изнутри тканей или снаружи, воздух при этом вытесняется из пор, и они заполняются жидкостью. Ионы вещества, находящиеся на поверхности кожи, получают возможность переместиться внутрь. Поэтому постоянный ток используется в лечебной практике в виде *электрофореза - введения лекарственных веществ через кожу или слизистые оболочки при помощи постоянного тока.*

Лекарство вводят с того полюса, зарядом которого оно обладает: анионы вводят с анода, катионы – с катода.

Лечебный электрофорез широко применяется в ветеринарной практике, поскольку он имеет ряд преимуществ перед другими способами введения лекарственных веществ. Терапевтическое действие оказывает не только лекарственное вещество, но и проходящий через организм животного постоянный ток малой величины. Лекарственные вещества вызывают непрерывное и длительное раздражение нервных окончаний, заложенных в месте воздействия, могут вступать в обменные процессы и оказывать непосредственное влияние на течение патологических реакций в тканях и клетках зоны воздействия.

В результате сочетанного действия лечебные эффекты большинства лекарств потенцируют и реализуются при достаточно низких концентрациях. Поступающие препараты накапливаются локально, что позволяет создать их значительные концентрации в зоне поражения или патологического очага. При таком введении отсутствуют побочные эффекты перорального и парентерального методов и значительно реже возникают аллергические реакции.

Электрофорез применяется при лечении простудных заболеваний, гайморитов, бронхитов, пневмоний.



## Тема №10. Электромагнетизм

### 10.1 Понятие магнитного поля. Закон Ампера. Напряженность магнитного поля. Вектор магнитной индукции. Магнитный поток

Уже в VI веке до нашей эры в Китае было известно, что некоторые руды (например, магнитный железняк) обладают способностью притягиваться друг к другу и притягивать на расстоянии железные предметы. Так как первые куски таких руд были обнаружены возле города Магнезия в Малой Азии, то в древней Греции они получили название *магнитов*.

После того как в Древнем Китае обратили внимание на способность естественных магнитов ориентироваться в магнитном поле земли, магниты стали применяться как компасы и получили название «указатель юга».

В XI веке китайцы изобрели компас со стрелкой, позволяющий быстро ориентироваться на местности при любой погоде.

Наибольшим притягивающим действием обладают определенные зоны магнита, называемые полюсами. Северным магнитным полюсом магнита называют обращенный на север конец свободно ориентированного в пространстве магнита. Обозначается буквой *N*. Противоположный конец магнита, направленный на юг, называется южным магнитным полюсом и обозначается *S*. Разноименные магнитные полюса притягиваются, одноименные – отталкиваются.

Таким образом, вокруг магнита в пространстве существует магнитное поле. Магнитное поле существует вокруг всякого проводника с током, независимо от материала проводника и характера его проводимости.

Так же как и статическое электрическое поле, магнитное поле является одним из глобальных физических факторов, под действием которых находятся все существующие на Земле биологические объекты. О существовании магнитного поля Земли знали уже в 16 веке. Английский ученый Гильберт высказал предположение, что Земля представляет собой намагниченный шар с двумя магнитными полюсами. В северном полушарии расположен южный геомагнитный полюс, а в южном полушарии – северный, причем геомагнитные полюса не совпадают с географическими и находятся от них на расстоянии примерно в 1000 км.

Магнитное поле является всепроникающим физическим фактором. По этой причине изучение основных характеристик магнитного поля, его действие на живые объекты представляет большое теоретическое и практическое значение.

При движении зарядов между ними возникает особый вид взаимодействия: например, два одинаково направленных параллельных тока притягиваются, а противоположно направленных – отталкиваются. Это взаимодействие происходит через поле, называемое *магнитным полем* – особый вид материи, посредством которого осуществляется силовое взаимодействие движущихся электрических зарядов или проводников с током.

### Магнитное поле создается:

- движущимися электрическими зарядами;
- проводником с током;
- постоянными магнитами;
- намагниченными телами;
- переменным электрическим током.

Источником магнитного поля является *элемент тока*  $I \cdot \Delta l$  – вектор, равный по модулю произведению бесконечно малого отрезка длины проводника на силу тока в нем и направленный вдоль этого тока.

Элементы тока играют такую же роль, как точечные электрические заряды.

Сила взаимодействия двух элементов тока (рисунок 10.1) определяется по *закону Ампера*:

$$F = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot \Delta l_1 \cdot I_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{r^2}, \quad (10.1)$$

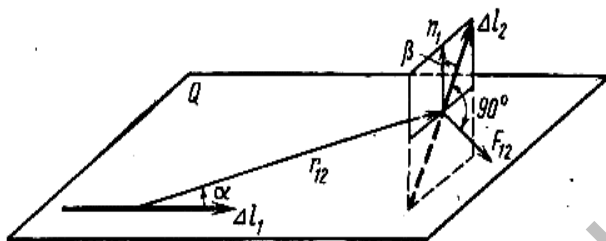


Рисунок 10.1

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – *магнитная постоянная*;

$I_1 \cdot \Delta l_1$  – первый элемент тока;

$I_2 \cdot \Delta l_2$  – второй элемент тока;

$\alpha$  – угол между первым элементом тока и прямой, соединяющей элементы токов;

$\beta$  – угол между вторым элементом тока и нормалью к плоскости, в которой лежит первый элемент тока;

$r$  – расстояние между элементами токов.

*Два параллельных проводника с током одинаковой длины* взаимодействуют друг с другом с силой, которая определяется по формуле:

$$F = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} \quad (10.2)$$

Два проводника с токами одинакового направления взаимно притягиваются, противоположно направленные токи взаимно отталкиваются.

Так как магнитное поле – это силовое поле, то его удобно графически изображать с помощью *силовых линий* – воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением силы, с которой магнитное поле действует в этой точке и направленные от северного (N) полюса к южному (S) полюсу.

Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, т.е. не имеют начала и конца, и их конфигурация зависит от форм проводника.

Направление силовых линий определяется с помощью **правила буравчика** (рисунок 10.2): *рукоятка буравчика, вкручиваемого по направлению тока, вращается в направлении магнитных силовых линий.*

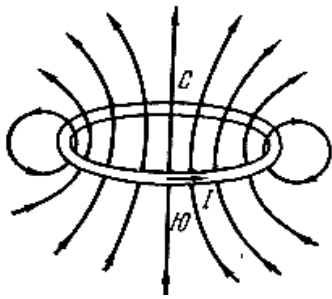


Рисунок 10.2

Для количественной характеристики поля, образуемого током в вакууме, вводят понятие **напряженности**.

**Напряженность магнитного поля** – векторная величина, направленная по касательной к силовым линиям магнитного поля.

**Напряженность**, создаваемая элементом тока, определяется по **закону Био – Савара - Лапласа**:

$$H = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (10.3)$$

где  $I$  – сила тока;

$\Delta l$  – длина проводника;

$\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике, создающем поле, и линией, соединяющей проводника с данной точкой;

$r$  – расстояние между элементом тока и данной точкой.

Единицей измерения напряженности в системе СИ является **А/м (Ампер на метр)**:

$$[H] = A/m$$

Из формулы (10.3) видно, что напряженность зависит от элемента тока, создающего данное магнитное поле, и расположения в этом поле рассматриваемой точки.

Для решения задач наиболее часто применяют следующие формулы:

**Напряженность магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током:**

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R}, \quad (10.4)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике;

$R$  – расстояние от рассматриваемой точки до проводника.

**Напряженность магнитного поля в центре кругового проводника:**

$$H = \frac{I}{2 \cdot R}, \quad (10.5)$$

где  $R$  – радиус кругового тока.

**Напряженность магнитного поля на оси соленоида или катушки с током:**

$$H = \frac{I \cdot n}{l}, \quad (10.6)$$

где  $n$  – число витков;  
 $l$  – длина соленоида.

**Вектор индукции (от латинского слова - наведение) магнитного поля** – количественная характеристика магнитного поля в веществе:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (10.7)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества, для воздуха  $\mu = 1$ .

Единицей вектора магнитной индукции в системе СИ является **Тл (Тесла)**:

$$[B] = \frac{H \cdot m}{A \cdot m^2} = \frac{H}{A \cdot m} = Tл$$

Направление вектора индукции магнитного поля совпадает с направлением напряженности магнитного поля.

Если в магнитное поле внести проводник с током, то на него будет действовать сила, определяемая по **формуле Ампера**:

$$F_A = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (10.8)$$



Рисунок 10.3

где  $B$  – вектор индукции магнитного поля;

$I$  – сила тока в проводнике;

$l$  – длина проводника;

$\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике и индукцией магнитного поля.

Направление силы Ампера определяется по **правилу левой руки** (рисунок 10.3): если расположить левую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отведенный в сторону большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током.

Предположим, что проводник расположен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, т.е.  $\alpha = 90^\circ$ , а  $\sin \alpha = 1$ . Тогда формула (10.8) примет вид:  $F_A = B \cdot I \cdot l$ . Выразим из нее вектор индукции:

$$B = \frac{F_A}{I \cdot l} \quad (10.9)$$

Отсюда следует, что **вектором магнитной индукции** называется величина, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на проводник с током в 1А, единичной длины, расположенный перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением силовых линий магнитного поля.

Количество силовых линий, пронизывающих воображаемую площадку, называется **магнитным потоком**.

**Магнитным потоком через площадку** называется величина, численно равная произведению вектора магнитной индукции на площадь площадки и на косинус угла между направлением вектора индукции и нормалью к площадке (рисунок 10.4):

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (10.10)$$

где  $S$  – площадь площадки;

$\alpha$  – угол между направлением вектора магнитной индукции и нормалью (перпендикуляром) к площадке.

Единицей измерения магнитного потока в системе СИ является **Вб (Вебер)**:

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$$

Если площадка расположена перпендикулярно вектору магнитной индукции, т.е.  $\alpha = 0, \cos \alpha = 1$ , тогда магнитный поток будет определяться по формуле:

$$\Phi = B \cdot S \quad (10.11)$$

Для однородного магнитного поля магнитный поток есть величина постоянная ( $\Phi = \text{const}$ ), для неоднородного магнитного поля магнитный поток – непостоянная величина ( $\Phi \neq \text{const}$ ).

Из формулы (10.10) видно, что магнитный поток может быть как положительным ( $\cos \alpha > 0$ ), так и отрицательным ( $\cos \alpha < 0$ ). В соответствии с этим линии магнитной индукции, выходящие из замкнутой поверхности, считаются положительными, а входящие – отрицательными. Так как линии магнитной индукции замкнуты, то магнитный поток сквозь замкнутую поверхность равен нулю.

## 10.2. Сила Лоренца. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Явление самоиндукции

**Сила Лоренца** – это сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

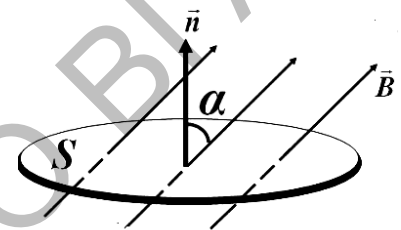


Рисунок 10.4

Сила Лоренца определяется по формуле:

$$F_{\text{Л}} = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (10.12)$$

где  $q$  – заряд частицы;

$v$  – скорость движения частицы;

$B$  – вектор индукция магнитного поля;

$\alpha$  – угол между направлением движения частицы и вектором индукции.

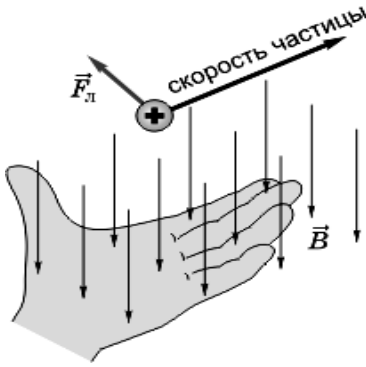


Рисунок 10.5

Направление силы Лоренца определяется по **правилу левой руки**: при положительном знаке заряда пальцы руки располагаются по направлению скорости; при отрицательном – противоположно (рисунок 10.5).

Из формулы Лоренца можно сделать два вывода:

1. Если скорость частицы равна нулю, то на нее не действует и сила Лоренца, т.е. магнитное поле не действует на неподвижную частицу.

2. Если  $\alpha = 0$  и  $\sin 0 = 0$ , следовательно, и сила Лоренца равна нулю, т.е. если вектор скорости параллелен вектору магнитной индукции, то сила со стороны магнитного поля на частицу не действует.

Так как сила Лоренца направлена перпендикулярно вектору скорости движущейся частицы, то она не изменяет величины скорости, а изменяет лишь направление движения.

Эрстед доказал, что вокруг проводника с током образуется магнитное поле. Фарадей опытным путем в 1831 году установил обратную задачу – с помощью магнитного поля можно получить ток, то есть *если контур находится в переменном магнитном поле или его вращают в постоянном магнитном поле, то в нем возникает переменный ток*. Это явление получило название **электромагнитной индукции**, а ток, возникающий при этом, – индукционный ток.

**Явление электромагнитной индукции** – это возникновение в замкнутом контуре электрического тока при изменении магнитного потока, пронизывающего его.

Рассмотрим возникновение ЭДС индукции, а, следовательно, и индукционного тока (рисунок 10.6). Рассмотрим проводник длиной  $l$ , движущийся в магнитном поле со скоростью  $v$ . При движении проводника свободные электроны, находящиеся в нем, также будут двигаться вместе с ним. На каждый движущийся электрон со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, которая направлена вверх и значит, что в верхней части проводника бу-

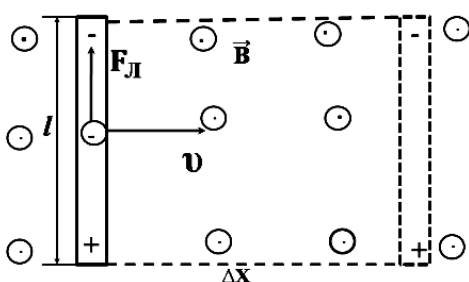


Рисунок 10.6

дет, что в верхней части проводника бу-

дет, накапливаться отрицательный заряд, а в нижней – положительный. В результате на концах проводника образуется разность потенциалов и будет индуцировать ЭДС, которая определяется по **закону Фарадея**.

Согласно определению разности потенциалов и ЭДС имеем:

$$\varepsilon_i = \frac{A}{q} = \frac{F_L \cdot \Delta x}{q} = \frac{I \cdot B \cdot l \cdot \Delta x}{q},$$

где  $A$  – работа;

$q$  – заряд;

$F_L$  – сила Лоренца;

$I$  – сила тока в проводнике;

$B$  – вектор индукции магнитного поля;

$l$  – длина проводника;

$\Delta x$  – расстояние, на которое перемещается проводник.

В свою очередь перемещение можно выразить формулой:  $\Delta x = v \cdot \Delta t$ .

То есть получаем:

$$\varepsilon_i = \frac{I \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t}{q}$$

Пусть  $q = I \cdot \Delta t$ , тогда получаем:

$$\varepsilon_i = \frac{I \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t}{I \cdot \Delta t}$$

Сокращаем общие множители и получаем ЭДС индукции проводника с током, движущегося в магнитном поле:

$$\varepsilon_i = B \cdot l \cdot v$$

Если проводник замкнут, то:

$$\varepsilon_i = -B \cdot l \cdot v$$

Так как  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , то  $\varepsilon_i = -B \cdot l \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , где  $l \cdot \Delta x = \Delta S$  – изменение площади

контура, а значит получаем:

$$\varepsilon_i = -B \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Используя формулу (10.11), получаем:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

*ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.*

Если контур имеет несколько витков, то ЭДС индукции рассчитывается по **закону Фарадея**:

$$\varepsilon_i = -n \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (10.13)$$

где  $n$  – число витков в контуре;

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  – скорость изменения магнитного потока.

Знак минус объясняется по **правилу Ленца**:

*индукционный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток стремится компенсировать изменения основного магнитного потока, вызвавшего появление данного индукционного тока.*

ЭДС, возникающая в контуре, движущемся в магнитном поле, является результатом действия сторонних сил – силы Лоренца, под действием которой происходит разделение зарядов.

Частым случаем явления магнитной индукции является явление самоиндукции.

**Явление самоиндукции** – явление возникновения ЭДС индукции в контуре при изменении силы тока в нем самом.

Явление самоиндукции возникает при замыкании или размыкании цепи постоянного электрического тока и при прохождении переменного тока.

Это приводит к тому, что при замыкании цепи определенное значение силы тока устанавливается не сразу, а постепенно с течением времени. С другой стороны, при отключении источника тока в замкнутых контурах ток прекращается не мгновенно.

ЭДС самоиндукции определяется из формулы (10.13) с учетом того что магнитный поток прямо пропорционален силе тока в контуре, т.е.  $\Phi = L \cdot I$ , то ЭДС самоиндукции будет определяться по формуле:

$$\varepsilon_{si} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (10.14)$$

$L$  – коэффициент самоиндукции или индуктивность контура.

*ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока и зависит от индуктивности контура.*



Из формулы (10.14) следует, что

$$L = \frac{\varepsilon_{si}}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad (10.15)$$

**Коэффициент самоиндукции** – величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре, при скорости изменения силы тока в нем 1А/с.

Единицей индуктивности в системе Си является **Гн (Генри)**:

$$[L] = \frac{Вб}{А} = Гн$$

Индуктивность зависит от формы и размеров контура, а также магнитных свойств окружающей среды. В частности индуктивность соленоида или катушки с током определяется по формуле:

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{n^2 \cdot S}{l}, \quad (10.16)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$n$  – число витков соленоида;

$S$  – площадь поперечного сечения соленоида;

$l$  – длина соленоида.

Магнитное поле неразрывно связано с током, то есть оно появляется, изменяется и исчезает вместе с появлением, изменением, исчезновением электрического тока. Следовательно, часть энергии тока идет на создание магнитного поля, а значит, что магнитное поле должно обладать энергией, равной работе, затрачиваемой током на создание этого поля.

**Энергия магнитного поля** определяется по формуле:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (10.17)$$

где  $L$  – индуктивность контура;

$I$  – сила тока.

Таким образом, энергия магнитного поля зависит от индуктивности контура и силы тока, протекающего по нему.

### 10.3. Вещество в магнитном поле: диа-, пара-, ферромагнетики

Все вещества, помещенные в магнитное поле, приобретают магнитные свойства, т.е. намагничиваются и поэтому все вещества в некоторой

мере изменяют внешнее магнитное поле. При этом одни вещества ослабляют внешнее магнитное поле, а другие усиливают его.

**Магнитная восприимчивость** – безразмерная величина, зависящая от природы вещества и характеризующая его способность к намагничению, то есть способности создавать свое собственное магнитное поле под действием внешнего поля.

Опыт показывает, что магнитная восприимчивость веществ (кроме ферромагнетиков) весьма мала, причем у диамагнетиков она отрицательна (наведенное поле противоположно внешнему), а у парамагнетиков – положительна (собственное поле совпадает с внешним).

Для количественной характеристики влияния вещества на внешнее магнитное поле вводят понятие относительной магнитной проницаемости вещества.

**Относительная магнитная проницаемость вещества** – величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля после внесения вещества больше или меньше индукции магнитного поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (10.18)$$

где  $B$  – магнитная индукция поля после внесения вещества;  
 $B_0$  – магнитная индукция в вакууме.

В атомах и молекулах любого вещества имеются круговые токи, образованные движением электронов по орбитам вокруг ядра – орбитальные токи. Каждому орбитальному току соответствует определенный магнитный момент, называемый спиновым орбитальным магнитным моментом. Кроме того, электроны обладают собственным или спиновым магнитным моментом. Собственным магнитным моментам обладает также ядро атома.

Геометрическая сумма орбитальных и спиновых магнитных моментов электрона и собственного магнитного момента ядра образует магнитный момент атома (молекулы) вещества. По величине суммарных магнитных моментов атомов и влиянию их на внешнее магнитное поле, все вещества делятся на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

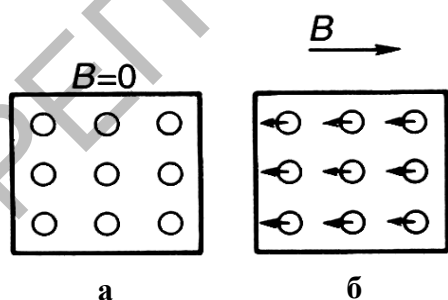


Рисунок 10.7

1. Подавляющее большинство веществ относится к **диамагнетикам** – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля.

У диамагнетиков магнитные моменты электронов взаимно скомпенсированы, суммарный момент атома равен нулю (рисунок 10.7 а). При внесении диамагнетиков во внешнее поле в них возникает собственное магнитное поле, отличное от нуля и направленное противоположно внешнему магнитному полю (рисунок 10.7 б). Таким образом, диамагнети-

ки уменьшают внешнее магнитное поле. Диамагнетики выталкиваются из магнитного поля.

Индукцированные магнитные моменты у диамагнетиков сохраняются до тех пор, пока существует внешнее поле. При ликвидации внешнего поля магнитные моменты атомов исчезают и диамагнетик размагничивается.

У диамагнетиков магнитная проницаемость меньше единицы, хотя и близка к ней, то есть  $\mu < 1$ .

К диамагнетикам относятся некоторые металлы (золото, серебро, висмут, медь), фосфор, сера, углерод, дистиллированная вода и большая часть органических соединений (углероды, белки, входящие в состав тканей организма).

2. **Парамагнетики** — вещества, которые намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля.

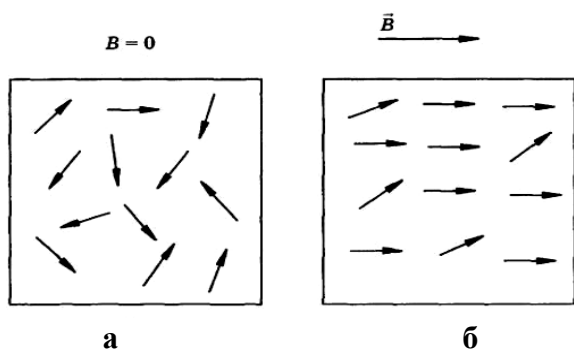


Рисунок 10.8

Молекулы парамагнетиков имеют отличные от нуля магнитные моменты и являются элементарными магнитами (рисунок 10.8 а). При отсутствии внешнего магнитного поля эти моменты расположены хаотически, т.е. суммарный магнитный момент вещества равен нулю. При внесении парамагнетика в магнитное поле магнитные моменты молекул ориентируются по направлению внешне-

го магнитного поля (рисунок 10.8 б). Таким образом, парамагнетики увеличивают внешнее магнитное поле. Парамагнетики «втягиваются» в магнитное поле.

При ликвидации внешнего магнитного поля вследствие теплового движения сразу же происходит разрушение ориентации атомных магнитных моментов и парамагнетик размагничивается.

У парамагнетиков магнитная проницаемость несколько больше единицы, то есть  $\mu > 1$ .

К парамагнетикам относятся щелочные и щелочноземельные металлы, кислород, молибден, водные растворы металлов, эритроциты крови и т.д.

3. Среди парамагнетиков выделяется группа **ферромагнетиков** - вещества (как правило, в твердом кристаллическом или аморфном состоянии), в которых при охлаждении ниже определенной температуры возникают магнитные свойства.

Ферромагнетики намагничиваются в сотни раз сильнее парамагнетиков и сохраняют собственное магнитное поле после прекращения действия внешнего магнитного поля. Это явление называется **остаточной намагниченностью** и лежит в основе образования естественных и искусственных магнитов.

Такие особенности ферромагнетиков обусловлены тем, что в их структуре имеются области, называемые доменами, магнитные моменты атомов и молекул, в которых имеют одинаковую ориентировку. Но в разных доменах моменты ориентированы по-разному и суммарный магнитный момент равен нулю (рисунок 10.9).

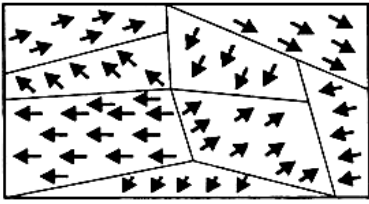


Рисунок 10.9

Под действием внешнего магнитного поля происходит ориентировка магнитных моментов самих документов (рисунок 10.10). При этом создается собственное магнитное поле, на несколько порядков более сильное, чем у парамагнетиков. При ликвидации внешнего магнитного поля ферромагнетики полностью не размагничиваются, так как тепловое движение не в состоянии быстро дезориентировать крупные совокупности атомов, которыми являются домены. Для размагничивания ферромагнетиков необходимо создать противоположное внешнее поле, т.е. приложить коэрцитивную силу. Размагничиванию способствуют нагревание и встряхивание ферромагнетиков.

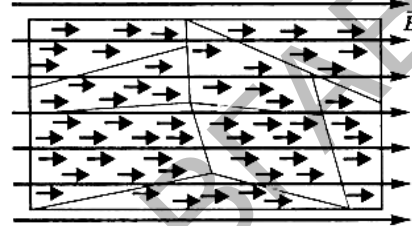


Рисунок 10.10

Магнитная проницаемость у ферромагнетиков может быть порядка десятков тысяч, то есть  $\mu \gg 1$ .

К ферромагнетикам относятся: железо, сталь, никель, кобальт, многие сплавы этих элементов с другими неферромагнитными соединениями.

#### 10.4. Действие магнитных полей на живые организмы. Применение магнитных полей в медицине

Магнитное поле оказывает воздействие на биологические системы, которые в нем находятся. Это воздействие изучает раздел биофизики, называемый *магнитобиологией*.

Живой и растительный мир постоянно находятся в магнитном поле Земли. Индукция магнитного поля Земли в целом невелика. На поверхности Земли вертикальная составляющая магнитного поля достигает максимального значения на магнитных полюсах (67 мкТл) и равна нулю на магнитном экваторе. Горизонтальная компонента максимальна на магнитном экваторе (33 мкТл) и равна нулю на магнитных полюсах. Геомагнитное поле непостоянно и колеблется по суткам, месяцам и годам. Причиной этому являются процессы, возникающие на Солнце, которые приводят к резкому возрастанию магнитного поля в верхних слоях атмосферы, что вызывает изменение геомагнитного поля. Это явление называется магнитной бурей. Такие бури чаще всего бывают в те годы, которые соответствуют 11-летним циклам активности Солнца.

Многолетние исследования подтвердили существование синхронности между циклами солнечной активности и численностью популяций жи-

вотных и насекомых, массовыми миграциями животных вне сезонов, изменением клеточного состава крови животных и человека, рождаемостью, смертностью и даже травматизмом на производстве. Исследователи на основе статистических данных, полученных за много лет, обратили внимание на связь магнитных бурь и вспышек эпидемий чумы, холеры, дифтерии, гриппа, менингита.

В период магнитных бурь возрастает размножение и токсичность ряда болезнетворных бактерий, повышается скорость свертывания крови и число лимфоцитов, ухудшается состояние больных, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями из-за повышения артериального давления и замедления коронарного кровообращения. Поэтому инфаркт миокарда, который наступает в период магнитных бурь, протекает тяжело и часто сопровождается осложнением и заканчивается смертью. При возмущенности геомагнитного поля нарушается функционирование центральной нервной системы. При этом замедляется реакция на внешние факторы, ухудшается сообразительность и т.д.

Кроме естественных магнитных полей, человек подвергается воздействию магнитных полей от технических установок и приборов. Современная техника насыщает окружающую нас среду мощными магнитными полями, интенсивность которых в тысячи и миллионы раз превосходит интенсивность геомагнитного поля.

Каково действие этих полей на живые существа? Этими вопросами занимаются сегодня и физики, биофизики, физиологи, биохимики и медики. Учеными установлен предел воздействия допустимых магнитных полей. Оптимальное стимулирующее действие постоянного магнитного поля (ПМП) на животных происходит при индукции 50 мТл и времени воздействия 30 минут. В крови животных, при оптимальном режиме действия постоянного магнитного поля, отмечено повышение резистентности эритроцитов, фагоцитарной активности нейтрофилов. При длительном воздействии на животных ПМП наибольшую активность организм проявляет в весеннюю пору года. Это выражается в активизации эритропоэза и повышением неспецифической резистентности. Максимальную активность организм животных проявляет после 21-28 дней опыта. Неблагоприятным результатом является однократное воздействие ПМП индукцией более 100 мТл, по времени свыше 100 минут и многократное более 35 сеансов воздействие ПМП индукцией 50 мТл по 30 минут ежедневно. При этом в организме развивается угнетение неспецифической резистентности и иммунной реактивности. Экспериментальные данные предполагают, что кратковременное воздействие ПМП более 5 Тл может оказать существенное отрицательное влияние на здоровье человека.

Кроме ПМП человек и животные подвергаются действию переменных магнитных полей (ПеМП) низкой частоты. Считается, что могут представлять опасность для здоровья такие поля с индукцией 50 мТл при частоте 50-60 Гц.

Существуют и другие гипотезы о механизмах действия МП, однако чисто физически объяснить действие МП на живой организм очень трудно, и хотя МП и применяют в медицине, механизм их действия еще во многом не ясен.

В основном *магнитобиологические эффекты* сводятся к следующему:

1. Наибольшее действие магнитное поле оказывает на сосудистую систему. Происходит расширение сосудов, причем это более выражено в легких, печени, селезенке.

2. Увеличивается число лейкоцитов и поднимается резистентность эритроцитов.

3. Изменяется электрическая активность мозга.

4. Уменьшается двигательная активность. Например, при индукции 0,4 Тл мышцы полностью прекращают движение и впадают в оцепенение.

Биотоки, возникающие в организме, являются источниками слабых магнитных полей. В некоторых случаях индукции таких полей удастся измерить. Так, например, на *регистрации временной зависимости индукции магнитного поля сердца* создан диагностический метод – *магнитокардиография*.

Метод измерения магнитных полей мозга получил название *магнитоэнцефалограмма (МЭГ)*, который существенно дополняет электроэнцефалографию.

Сильные постоянные магниты применяются в медицине для удаления мелких ферромагнитных тел (металлические опилки и пр.) из глаз и открытых ран, для чего промышленность выпускает магниты с наконечниками специальной формы. В последнее время широкое применение нашли магнитные зонды, предназначенные для профилактики кормового травматизма крупного рогатого скота. Грубые корма (сено, солома, комбикорм и пр.) часто засорены различными инородными металлическими телами, которые, будучи поглощены с кормом, вызывают кормовой травматизм. Эти тела в основном накапливаются в сетке благодаря ее малому объему и ячеистому строению слизистой оболочки. При сокращении сетки, брюшного пресса и диафрагмы они перемещаются, а острые предметы обычно вонзаются в слизистую оболочку или пронизывают всю толщу преджелудка.

Промышленность также выпускает магнитофорные аппликаторы (греч. форос - несущий), изготовленные из смеси полимерных веществ (каучук, смолы) и намагниченных порошкообразных ферромагнитных наполнителей с магнитной индукцией на поверхности (15÷40) мТл. Аппликаторы эластичны, их можно накладывать на любой участок тела, они удобны в гигиеническом отношении. Магнитофорные аппликаторы оказывают некоторое обезболивающее, противовоспалительное действие и способствуют улучшению кровообращения.

Применение в лечебно-профилактических целях постоянных, низкочастотных переменных и пульсирующих магнитных полей получило название *магнитотерапия*.

## Тема №11. Переменный ток и его действие на биологические системы

### 11.1. Переменный ток. Мгновенное, амплитудное и действующее значение переменного тока. Закон Джоуля – Ленца

*Переменный ток* – ток, который периодически изменяется по величине и направлению с течением времени.

Переменный ток бывает синусоидальный, прямоугольный, импульсный и пилообразный. Мы будем рассматривать ток, зависящий от времени по гармоническому закону.

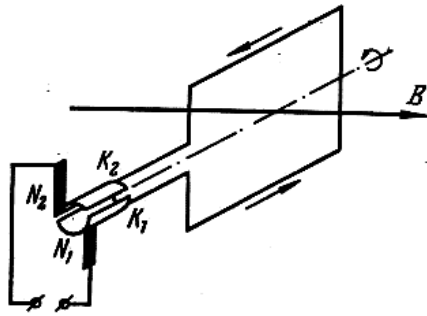


Рисунок 11.1

Для получения синусоидального переменного тока используют генератор, действие которого основано на явлении электромагнитной индукции.

Получить переменный ток можно при вращении замкнутого контура в постоянном магнитном поле. При вращении рамки в постоянном магнитном поле (\$B = \text{const}\$) с постоянной угловой скоростью (\$\omega = \text{const}\$) магнитный поток периодически изменяется. В связи с этим на концах проводника возникает периодически меняющаяся ЭДС индукции, которая определяется по закону Фарадея:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega \cdot t$$

Обозначим максимальное значение ЭДС \$\varepsilon\_0 = B \cdot S \cdot \omega\$, получим формулу, по которой определяется ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (11.1)$$

где \$\varepsilon\_i\$ – мгновенное значение ЭДС;

\$\varepsilon\_0\$ – максимальное или амплитудное значение ЭДС;

\$\omega\$ – циклическая частота;

\$t\$ – время.

Эта ЭДС в свою очередь приводит к возникновению переменного тока силой:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{\varepsilon_0}{R} \cdot \sin \omega \cdot t = I_0 \cdot \sin \omega \cdot t \quad (11.2)$$

где \$I\$ – мгновенное значение силы тока, зависящее от времени;

\$I\_0\$ – амплитудное или максимальное значение силы тока.

В большинстве стран применяются переменный ток с частотой 50 или 60 Гц. В некоторых странах, например, в Японии, используются оба стандарта. В нашей стране используется переменный ток с частотой 50 Гц.

Кроме мгновенного и максимального значения тока и ЭДС, для характеристики переменного тока вводят понятие эффективного или действующего значения ЭДС и тока, которые обычно указывают на шкале электроизмерительных приборов.

*Эффективным или действующим значением переменного тока называется такое значение постоянного тока, при котором в той же цепи, за тот же промежуток времени выделяется такое же количество теплоты, как и при прохождении данного переменного тока:*

$$I_{\text{эф.}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}; \quad \varepsilon_{\text{эф.}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}; \quad U_{\text{эф.}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad (11.3)$$

Количество теплоты, которое выделяется при прохождении переменного тока, определяется по **закону Джоуля - Ленца**:

$$Q = I_{\text{эф.}}^2 \cdot R \cdot t = U_{\text{эф.}} \cdot I_{\text{эф.}} \cdot t = \frac{U_{\text{эф.}}^2}{R} \cdot t, \quad (11.4)$$

где  $Q$  – количество теплоты;

$I_{\text{эф.}}$  – эффективное значение силы тока;

$R$  – сопротивление;

$t$  – время;

$U_{\text{эф.}}$  – эффективное значение напряжения.

## 11.2. Цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением. Импеданс. Обобщенный закон Ома

Рассмотрим цепь переменного тока с активным сопротивлением.

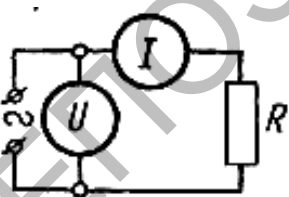


Рисунок 11.2

*Активное сопротивление  $R$  – сопротивление, при прохождении тока в нем происходит необратимая потеря энергии, которая переходит в теплоту.*

Активное сопротивление определяется по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (11.5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника;

$L$  – длина проводника;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника.



Рассмотрим явления, происходящие в цепи переменного тока с индуктивным сопротивлением (рисунок 11.3).

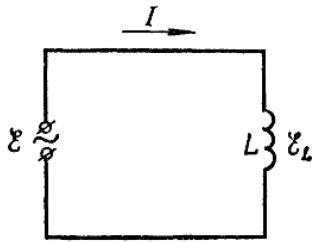


Рисунок 11.3

**Индуктивное сопротивление**  $R_L$  – это сопротивление катушки или соленоида.

Индуктивное сопротивление определяется формулой:

$$R_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot L, \quad (11.6)$$

где  $L$  – индуктивность катушки;  
 $\nu$  – частота переменного тока.

На индуктивном сопротивлении не происходит потери энергии и поэтому его называют реактивным.

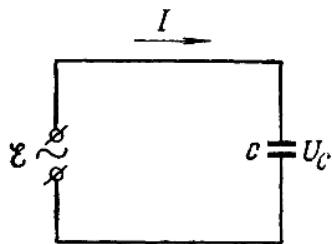


Рисунок 11.4

Рассмотрим цепь переменного тока с емкостным сопротивлением (рисунок 11.4).

**Емкостное сопротивление**  $R_C$  – это сопротивление конденсатора (устройство для накопления заряда и энергии электрического поля).

Попеременно заряжаясь и разряжаясь, конденсатор поддерживает переменный ток во внешней цепи.

Этой цепи.

Емкостное сопротивление определяется формулой:

$$R_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot C}, \quad (11.7)$$

где  $C$  – емкость конденсатора.

Рассмотрим цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями, соединенными последовательно (рисунок 11.5).

**Импеданс** – полное сопротивление в цепи переменному току.

**Импеданс** при последовательном соединении сопротивлений определяется по формуле:

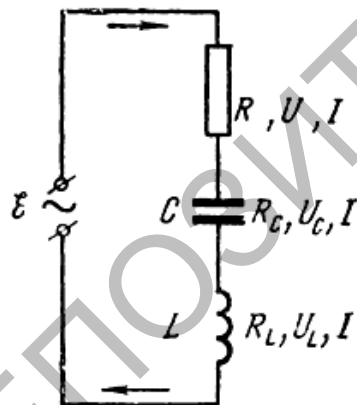


Рисунок 11.5

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} \quad (11.8)$$

Тогда **обобщенный закон Ома** для цепи переменного тока примет вид:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}} \quad (11.9)$$

**Угол сдвига фаз** между током и напряжением в данной цепи определяется по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{R_L - R_C}{R} \quad (11.10)$$

Как видно из формулы, сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения зависит от значений индуктивного и емкостного сопротивлений, которые, в свою очередь, зависят от частоты переменного тока. С ростом частоты тока индуктивное сопротивление увеличивается, а емкостное – уменьшается. При этом возможна ситуация, когда  $R_L = R_C$ , и сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения отсутствует ( $\operatorname{tg}\varphi = 0$ ). В этом случае импеданс будет минимален, а амплитудное значение силы тока максимально, то есть в цепи наступает электрический резонанс, т.е. резкое возрастание силы тока в цепи.

Сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения влияет на **мощность переменного тока**, которая определяется по формуле:

$$N = I_{\text{эф.}} \cdot U_{\text{эф.}} \cdot \cos\varphi, \quad (11.11)$$

где  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности.

**Коэффициент мощности** – безразмерная физическая величина, являющаяся энергетической характеристикой электрического тока.

Коэффициент мощности характеризует приемник электроэнергии переменного тока. Коэффициент мощности необходимо учитывать при проектировании электросетей. Низкий коэффициент мощности ведет к потерям электроэнергии в электрической сети. Неверно рассчитанный коэффициент мощности может привести к избыточному потреблению электроэнергии и снижению КПД электрооборудования, питающегося от данной сети.

Максимальная мощность в цепи переменного тока будет при отсутствии сдвига фаз между силой тока и напряжением, то есть при электрическом резонансе.

### **11.3. Биологическое действие переменного тока. Дисперсия электропроводности тканей живого организма**

Для переменного тока биологические ткани представляют последовательно соединенные только активное и емкостное сопротивления. Емкостное сопротивление биологических тканей обусловлено тем, что клетка с точки зрения физики представляет собой сферический конденсатор. Активное сопротивление обусловлено наличием межтканевых жидкостей – электролитов. Индуктивное сопротивление в биообъектах практически отсутствует, т.к. структуры, эквивалентной катушки индуктивности в живом организме нет. В связи с этим сопротивление организма переменному току

оказывается меньше, чем постоянному. По этой причине переменный ток более опасен для жизни человека, чем постоянный.

*Импеданс в живом организме* определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} \quad (11.12)$$

Полное сопротивление организма зависит от сухости кожных покровов. При сухой коже сопротивление составляет  $10^4 - 10^6$  Ом. Влажная кожа уменьшает сопротивление до  $10^3$  Ом и меньше.

Действие переменного тока на организм зависит от частоты.

На *низких частотах (50-100 Гц)* переменный ток действует так же, как постоянный ток, то есть поляризационные эффекты почти так же велики, как и при действии постоянного тока. Это значит, что смещения ионов достаточны, чтобы вызвать изменение их концентрации по обе стороны клеточной мембраны, сопровождающееся раздражающим действием на клетку. Так как импеданс ткани зависит от проницаемости клеточных мембран, то его величина, измеряемая на низких частотах, в ряде случаев может служить мерой проницаемости клеточных мембран.

На *средних частотах (4 000-5 000 Гц)* поляризационные эффекты менее выражены, и данный ток применяется для электростимуляции (восстановления деятельности органов и тканей, утративших нормальную функцию).

Переменный ток *высокой частоты (более 2 000 000 Гц)* не вызывает поляризации клетки поэтому не оказывает раздражающее действие на ткани организма. При этом емкостное сопротивление практически равно нулю и ткани обладают только активным сопротивлением, на котором выделяется теплота. В связи с этим высокочастотные токи применяются для прогревания глубоко лежащих тканей.

Живые ткани обладают ярко выраженной *дисперсией электропроводности*, т.е. *зависимостью электропроводности от частоты переменного тока*.

Импеданс (или электропроводность) тесно связан как со свойствами клеточных мембран, так и со свойствами клеточных и межклеточных жидкостей. Получить сведения о явлениях, происходящих в тканях, можно, наблюдая за относительным изменением их импеданса между электродами любой формы, что широко используется в медицине и ветеринарии, например, для диагностики воспалительных процессов. В начальной стадии воспаления структура клеток заметно не меняется и, следовательно, не меняется их электроемкость, однако происходит набухание клеток и тканей, что приводит к возрастанию активного сопротивления. Измеряя импеданс на низких частотах, по значительному возрастанию импеданса, можно судить о воспалительном процессе. При дальнейшем развитии воспаления химический состав и структура клеток изменяется, увеличивается

проницаемость мембран для ионов, что ведет к уменьшению емкости и емкостного сопротивления клеток и, в конечном счете, к уменьшению их полного сопротивления. То есть сильное уменьшение импеданса ткани на низких частотах может свидетельствовать о развитом воспалительном процессе.

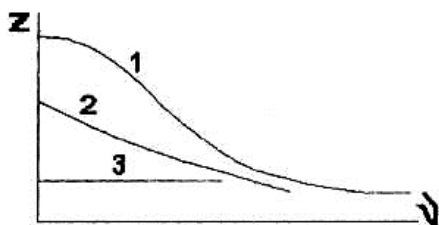


Рисунок 11.6

Такая зависимость присуща только живым тканям; при пропускании тока через обычные растворы электролитов дисперсия не наблюдается. Причина дисперсии заключается в том, что на величину сопротивления при низких частотах значительное влияние оказывает макроструктурная поляризация. При увеличении частоты переменного тока уменьшаются пограничные поляризационные эффекты, это ведет к уменьшению полного сопротивления ткани, и дисперсионная кривая 1 обладает значительной крутизной (рисунок 11.6). При повреждении ткани возрастает проницаемость клеточных мембран, что приводит к уменьшению полного сопротивления на низких частотах. Поэтому кривая 2 (рис. 11.6) обладает меньшей крутизной. При отмирании ткани поляризация на границе раздела практически исчезает и зависимость импеданса от частоты отсутствует (рис. 11.6). Таким образом, по крутизне дисперсионной кривой можно судить о жизнеспособности той или иной ткани, что имеет большое значение, когда эта ткань предназначена для трансплантации.

Полное сопротивление ткани живого организма в значительной степени зависит от состояния кровообращения и от степени наполнения кровеносных сосудов, проходящих через ткань. Кровь имеет меньшее удельное сопротивление, чем стенки сосудов или клеток, и поэтому при наполнении ткани кровью во время систолы полное сопротивление уменьшается, а при диастоле увеличивается. *Исследование периферического кровообращения путем измерения импеданса называется реографией.* Для реографии применяют переменный ток с частотой **20-30 кГц** и измеряют полное сопротивление определенного участка тканей в течение цикла сердечной деятельности. Этим методом исследуют сосуды головного **мозга** (реоэнцефалография), **сердца** (реокардиография), **конечностей** (реовазография), **глаз** (реоофтальмография), **легких** (реопульмонография).

#### 11.4. Лечебное действие электромагнитных полей

Наша планета и обитающие на ней живые существа постоянно находятся под действием электромагнитных волн, излучаемых Солнцем и галактиками. Диапазон частот этих волн - от 10 МГц до 10 ГГц, однако ин-

тенсивность их незначительна и обычно не превышает  $10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup>, хотя при солнечных вспышках она может возрасти в сотни раз.

Эксперименты над животными и наблюдения за людьми показывают, что электромагнитные поля оказывают влияния на многие функции живых организмов и практически все живые существа чувствительны к их действию. При взаимодействии с биообъектами энергия поля в основном затрачивается на их нагревание.

В низкочастотном диапазоне (до 10 МГц) почти все ткани можно рассматривать как проводящие среды и превращение энергии ЭМП в теплоту связано преимущественно с потерями на джоулево тепло. При более высоких частотах, то есть в диапазоне УВЧ и СВЧ ткани нельзя рассматривать как проводники. Даже нагревание крови при СВЧ-облучении обусловлено диэлектрическими потерями. Глубина проникновения ЭМП в ткани зависит от частоты: чем больше частота, тем меньше проникающая способность электромагнитных волн. Ориентировочно можно считать, что глубина проникновения ЭМП в ткани равна  $0,1$  длины волны.

Количество теплоты, выделяемое в тканях, зависит от электрических параметров ткани, от частоты и интенсивности облучения. Органы с относительно малым количеством кровеносных сосудов (глаза, семенники) нагреваются сильнее, так как кровь, обладающая большой теплоемкостью, хорошо отводит тепло.

При высоких интенсивностях ЭМП нагрев может быть настолько сильным, что возникают ожоги, некрозы тканей, дегенеративные изменения в клетках. Чисто физические соображения говорят о том, что реакция организма возможна только на поля больших интенсивностей, вызывающих недопустимый нагрев тканей. Длительное время считалось, что природные ЭМП не оказывают влияния на биосферу. Однако в последнее время было обнаружено, что самые различные организмы – от одноклеточных до млекопитающих – обладают высокой чувствительностью к ЭМП, интенсивность которых близка к природным. При этом чувствительность к ЭМП повышается при переходе от менее организованных к более организованным системам. К эффектам нетеплового характера относится в основном действие ЭМП на центральную и вегетативную нервную систему, что, в свою очередь, приводит к функциональным сдвигам других физиологических систем организма. К таким сдвигам относятся нарушения ритма сердца, кровяного давления, обменных процессов. У человека могут нарушаться зрительные, звуковые, осязательные ощущения. У животных происходит изменение эмоционального состояния: от угнетенного до возбужденного.

Живые организмы получают посредством природных ЭМП информацию о состоянии внешней среды в дополнение к информации, доставляемой обычными органами чувств. Кроме того, создаваемые самими организмами слабые ЭМП используются ими для внутривидовой и межвидовой сигнализации. Такие собственные ЭМП удалось зарегистрировать у человека, лягушки и насекомых на расстоянии от нескольких сантиметров до

нескольких метров от поверхности тела. Не исключено, что взаимодействие собственного магнитного поля с геомагнитным полем объясняют навигации рыб, птиц и насекомых.

Человек, находящийся в ЭМП с частотами 425, 1310 и 2982 МГц слышит жужжание, свист и щелканье. Это объясняется тем, что ЭМП оказывает непосредственное действие на электрическое поле нейронов мозга, вследствие чего и возникает ощущение звука.

Многое в действии высокочастотных ЭМП на живой организм остается еще неясным, в частности его влияние на генетический код.

Электрические методы с каждым годом все шире применяются в медицине и ветеринарии для лечения и диагностики.

Воздействие электромагнитных полей на организм вызывает различные терапевтические эффекты, действие которых характеризуется **интенсивностью нагрева** – это количество теплоты, приходящееся на единицу объема за единицу времени:

$$q = \frac{Q}{V \cdot t} \quad (11.13)$$

Рассмотрим основные методы, применяемые в ветеринарной клинической практике.

**Дарсонвализация** – лечебное воздействие на отдельные участки тела слабым импульсным переменным током с частотой от 200 до 500 кГц при напряжении до 20 кВ.

Нагрев тканей практически незаметен, так как сила тока очень мала. Более существенное действие оказывают поляризационные эффекты на клеточных мембранах. При дарсонвализации происходит раздражение кожных рецепторов мелкими искрами, проскакивающими между телом и электродом. Это влечет за собой рефлекторные ответные реакции со стороны внутренних органов: расширяются артериолы и капилляры в зоне воздействия, повышается тонус венозных стенок, усиливается циркуляция крови.

**Диатермия** – прогревание глубоколежащих тканей эндогенным теплом (создается внутри самого организма), создаваемым высокочастотным током (1-3 А при напряжении 200-250 В и частоте 1-1,5 МГц).

Диатермия позволяет повысить локальную температуру тканей на 2-5<sup>0</sup>С, причем незначительно повышается и температура всего тела.

**Интенсивность нагрева** при диатермии определяется по формуле:

$$q = i^2 \cdot \rho, \quad (11.14)$$

где  $i$  – плотность тока;

$\rho$  – удельное сопротивление ткани.

Физиологический эффект диатермии заключается во внутритканевом повышении температуры, которое может сохраняться в течение нескольких часов после окончания процедуры, очевидно, за счет усиления обменных

процессов в тканях под действием тока. Диатермическое повышение температуры приводит к расширению кровеносных сосудов, то есть к увеличению кровоснабжения, а также к активации ряда биохимических процессов. Под влиянием прогрета повышаются также фагоцитарные и бактерицидные свойства тканей.

**Хирургическая диатермия (электрохирургия)** – хирургическое воздействие высокочастотным током на ткани животного с целью их рассечения или коагуляции.

При электрорезании, или электротомии, рассечение тканей осуществляется не за счет механического воздействия режущего инструмента, а в результате интенсивного парообразования тканевой жидкости в области, прилегающей к электроду. Тепло, возникающее при прохождении тока через ткань, приводит к коагуляции белков, в результате чего наблюдается «сваривание» кровеносных сосудов.

Электрокоагуляция используется для сварки кровеносных сосудов и альвеол, для крепления сетчатки к сосудистой оболочке глаза при ее отслоении.

Хирургическая диатермия имеет перед обычной хирургией следующие преимущества: малая потеря крови вследствие коагуляции стенок кровеносных сосудов; слабовыраженные послеоперационные боли вследствие сваривания нервных окончаний; бактерицидное действие, обусловленное закупоркой кровеносных сосудов, куда не проникают бактерии, а также гибель бактерий под действием тока; меньшая реакция организма на подлежащие рассасыванию инородные вещества.

**Индуктотермия** – лечебное воздействие высокочастотного электромагнитного поля (с частотой 10-15 МГц), образующееся током, протекающим по спирали из гибкого кабеля.

**Интенсивность нагрева** при индуктотермии определяется по формуле:

$$q = k \cdot \frac{B_{\text{эф.}}^2 \cdot \omega^2}{\rho}, \quad (11.15)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;

$B_{\text{эф.}}$  – эффективное значение вектора индукции магнитного поля;

$\omega$  – циклическая частота;

$\rho$  – удельное сопротивление ткани.

Физиологическое действие индуктотермии мало чем отличается от действия диатермии, но она дает более глубокое и равномерное прогревание.

**УВЧ терапия** – лечебное воздействие высокочастотного электрического поля (частота - 30-300 МГц).

**Интенсивность нагрева** при УВЧ терапии определяется по формуле:

$$q = \frac{E_{эф.}^2}{\rho}, \quad (11.16)$$

где  $E_{эф.}$  – эффективное значение напряженности электрического поля.

Тепловой эффект при УВЧ сравнительно невелик. Электрическое поле оказывает ряд физико-химических воздействий, к которым относят усиление активизации ферментов, превращение грубодисперсных белковых молекул в менее крупные с соответствующим изменением рН цитоплазмы.

**Микроволновая терапия** – используются сверхвысокочастотные электромагнитные волны (частота  $10^6 - 10^8$  Гц).

**Интенсивность нагрева** при микроволновой терапии определяется по формуле:

$$q = k \cdot E^2 \cdot \omega^2 \quad (11.17)$$

Механизм физиологического действия микроволновой терапии состоит из первичного и вторичного действий. Первичное действие – это непосредственное влияние микроволн на ткани, а вторичное – возникающие в ответ нейрорефлекторные и нейрогуморальные реакции организма. Первичное действие имеет место непосредственно в облученном участке тела и состоит из теплового и нетеплового компонентов.

Наибольшее выделение тепла происходит в водосодержащих тканях. Нетепловой механизм сводится к электрохимическим и структурным перестройкам, которые влияют на обменные процессы в клетках.

Что касается вторичного механизма, то он сводится в основном к влиянию поглощенной энергии на рецепторы. Раздражение от рецепторов поступает через нервные каналы в центральную нервную систему, что вызывает рефлекторные реакции. Весьма существенно, что под действием микроволн образуются биологически активные вещества (гистамин, ацетилхолин и др.), которые, проникая вне зоны облучения с потоками крови и лимфы, вызывают раздражение рецепторов далеко от места облучения. Таким образом, локальное облучение приводит к общему физиологическому эффекту.

Весьма перспективно *обезболивающее действие переменного синусоидального тока с различной формой импульсов - электронаркоз*. Под электронаркозом можно безболезненно делать операции, что особенно важно при кастрации, обрезании копытцев, которые требуют значительных физических усилий и фиксации животных. Преимущество - быстрота обезболивания и пробуждения, точность дозировки, отсутствие токсичности, простота применения.

На мясопромышленных предприятиях перед убоем проводят **электрооглушение**, чтобы выключить сознание, лишить его защитных функций. Для электрооглушения применяют переменный ток с напряжением 220В при силе тока от 0,8 до 1,2А. Шоковое состояние сохраняется около 5 минут после воздействия.



## IV. ОПТИКА

**Оптика** (от греческого *optike* – наука о зрительных восприятиях) – раздел физики, изучающий закономерности излучения, поглощения и распространения электромагнитных волн в диапазоне от 2 нм до 450 мкм.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны и поэтому оптика – часть общего учения об электромагнитном поле.

К оптическому излучению помимо воспринимаемого человеческим глазом видимого излучения (обычно называемого светом) относятся инфракрасное и ультрафиолетовое излучения.

### Тема №12. Геометрическая оптика. Основы фотометрии

#### 12.1. Природа света. Законы отражения и преломления света. Явление полного внутреннего отражения. Рефрактометр

Взгляды на природу света менялись с течением времени. С конца 17 в. в оптике шла борьба между **корпускулярной** теорией Ньютона и **волновой** теорией Гюйгенса.

Ньютон считал, что свет представляет собой поток корпускул (частиц), выбрасываемых светящимся телом и летящих прямолинейно. Эта теория объясняла закон прямолинейного распространения света, законы отражения и преломление, однако не могла объяснить явление интерференции, дифракции и поляризации света.

По теории Гюйгенса свет представляет собой продольные волны, распространяющиеся в упругой среде – эфире.

В 1818 г. Т. Юнг и О. Френель установили поперечность световых волн и дали полное объяснение явлением интерференции, дифракции и поляризации света.

В 1865 г. Д. Максвелл, основываясь на одинаковой скорости распространения электромагнитных и световых волн, высказал гипотезу об электромагнитной природе света. Эта гипотеза получила подтверждение в опытах Г. Герца и П. Н. Лебедева. Согласно этой теории, свет представляет электромагнитные волны с очень малой длиной волны.

В 1900 г. М. Планк высказал идею о дискретности испускания и поглощения света. Эта идея получила подтверждение в 1905 г. в исследованиях А. Эйнштейна по фотоэффекту. В результате появилась **квантовая**, или **фотонная**, теория света. Согласно этой теории, свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу и представляет собой поток особых частиц – **квантов** электромагнитного поля, называемых **фотонами**.

Волновые свойства света проявляются в явлениях интерференции, дифракции, поляризации. Корпускулярные свойства преимущественно проявляются при взаимодействии света с веществом (фотоэффект и др.).

Фотоны обладают нулевой массой покоя и движутся со скоростью, равной скорости света в вакууме:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм света представляет собой проявление взаимосвязи двух основных форм материи – вещества и поля.

**Геометрическая оптика** — раздел оптики, изучающий законы распространения света в прозрачных средах, отражения и преломления света и принципы построения изображений при прохождении света в оптических системах без учета его волновых свойств.

Основное понятие геометрической оптики - световой луч.

**Световой луч** – это линия, вдоль которой распространяется энергия световой волны.

Из опыта известны четыре закона геометрической оптики.

#### Основные законы геометрической оптики:

1. Закон прямолинейного распространения света: в однородных средах свет распространяется прямолинейно.

2. Закон независимости световых лучей: световые лучи, пересекаясь, не влияют друг на друга.

3. Законы отражения.

4. Законы преломления.

Свет, переходя из одной среды в другую, частично отражается от поверхности раздела сред, частично преломляется и проходит внутрь второй среды, в которой в свою очередь частично поглощается и частично проходит сквозь нее.

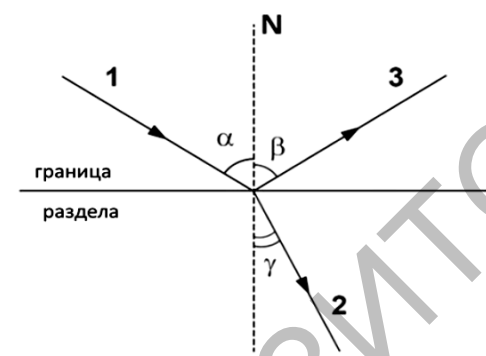


Рисунок 12.1

Явление **отражения** заключается в том, что свет, попадая на границу раздела двух сред, возвращается в первоначальную среду (рисунок 12.1).

**Угол падения  $\alpha$**  - угол между падающим лучом и перпендикуляром.

**Угол отражения  $\beta$**  - угол между отраженным лучом и перпендикуляром.

#### Законы отражения света:

1. Луч падающий (1), луч отраженный (3) и перпендикуляр (N), восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения равен углу падения:  $\alpha = \beta$  (12.1)

Отражение света от гладких полированных поверхностей является зеркальным. Если отражающая поверхность является матовой, т. е. ее неровности соизмеримы с длиной волны света и расположены беспорядочно, то происходит диффузное отражение.

Когда световой луч падает на границу раздела двух прозрачных сред, он делится на два луча: отраженный и преломленный. Преломленный луч распространяется во второй среде, изменив свое направление.

**Преломлением света на границе двух сред** называется изменение направления распространения луча при его переходе из первой среды во вторую (рисунок 12.1). На рисунке  $\alpha$  – угол падения,  $\gamma$  - угол преломления.

**Угол преломления  $\gamma$**  - угол между преломленным лучом(2) и перпендикуляром(N).

Оптической характеристикой среды является **абсолютный показатель преломления**.

**Абсолютным показателем преломления** называется величина, которая показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (12.2)$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  
 $v$  – скорость света в данной среде.

**Законы преломления света:**

1. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная отношению абсолютных показателей преломления второй и первой сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}, \quad (12.3)$$

где  $n_{2,1}$  – относительный показатель преломления света.

**Относительный показатель преломления** показывает, во сколько раз скорость света в первой среде больше скорости света во второй:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (12.4)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления соответственно первой и второй среды.

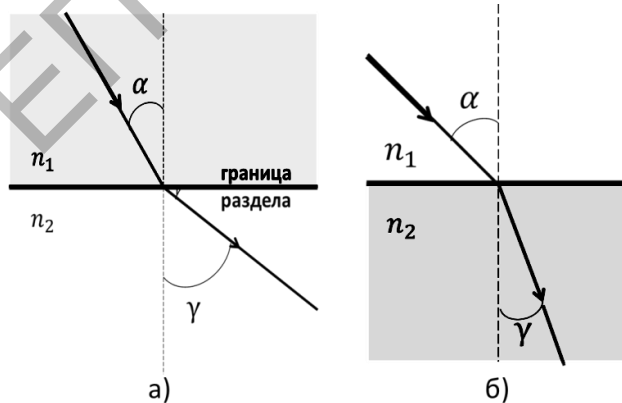


Рисунок 12.2

Среда, у которой абсолютный показатель преломления больше, называется **оптически более плотной**.

От соотношения показателей преломления двух сред зависит направление преломленного луча (рисунок 12.2):

- при переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду ( $n_1 > n_2$ )

угол преломления оказывается больше угла падения:  $\gamma > \alpha$  (рисунок 12.2 а);  
 - при переходе из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду ( $n_1 < n_2$ ) угол преломления меньше угла падения:  $\gamma < \alpha$  (рисунок 12.2 б).

Рассмотрим случай, когда свет переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ).

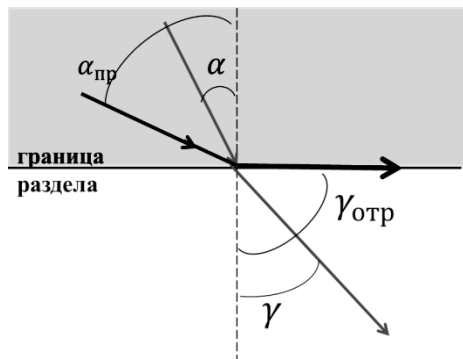


Рисунок 12.3

При увеличении угла падения света, угол преломления будет тоже увеличиваться. При определенном угле падения, который называется **предельным углом полного внутреннего отражения**  $\alpha_{np}$ , угол преломления  $\gamma$  станет равен  $90^\circ$  (рисунок 12.3). При дальнейшем увеличении угла падения падающий луч не преломляется, а полностью отражается от границы раздела. Это явление называется

полным внутренним отражением.

**Полное внутреннее отражение** - явление, при котором при переходе света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную угол преломления равен  $90^\circ$ .

Определим предельный угол полного внутреннего отражения. Запишем 2-й закон преломления:

$$\frac{\sin \alpha_{np}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

Т.к.  $\sin 90^\circ = 1$ , то закон преломления для случая полного внутреннего отражения примет вид:

$$\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1} \quad (12.5)$$

Явление полного внутреннего отражения используется при устройстве приборов с волоконной оптикой, рефрактометров и др. В волоконной оптике роль световодов выполняет пучок тонких стеклянных нитей, каждая из которых покрыта оболочкой из вещества с меньшим показателем преломления. Такой световод может переносить свет, как по прямолинейному, так и по криволинейному пути. В медицине световоды используют для освещения светом внутренних полостей и для передачи изображения (например, гастроэнтероскопия).

**Рефрактометры** - это приборы, определяющие показатель преломления веществ. Так как показатель преломления раствора зависит от концентрации растворенного вещества, то его можно использовать для определения концентрации веществ в растворе (например, содержание белка в сыворотке крови), состава и структуры вещества, контроля качества и со-

става различных продуктов в химической и фармацевтической промышленности.

**Рефрактометрия** – совокупность методов исследования физико-химических свойств различных веществ на основании измерения их показателей преломления.

## 12.2. Линзы. Построение изображений в линзах. Формула тонкой линзы

**Линза** - прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, каждая из которых может быть выпуклой или вогнутой.

Прямая, проходящая через центры этих сфер, называется **главной оптической осью линзы**.

Проходя через линзу, световой луч изменяет направление - отклоняется. Если отклонение происходит в сторону оптической оси, то линза называется **собирающей**, в противном случае линза называется **рассеивающей**.

Любой луч, падающий на собирающую линзу параллельно оптической оси, после преломления проходит через точку оптической оси ( $F$ ), называемую **главным фокусом**. Для рассеивающей линзы через фокус проходит продолжение преломленного луча.

У каждой линзы имеются два фокуса, расположенные по обе ее стороны (рис.12.4).

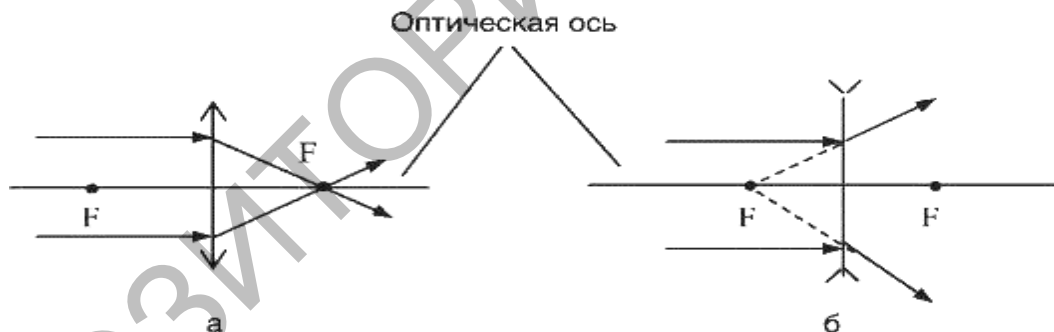


Рисунок 12.4

Расстояние от фокуса до оптического центра линзы называется **главным фокусным расстоянием  $f$**

Фокусное расстояние собирающей линзы больше нуля ( $f > 0$ ), для рассеивающей линзы фокусное расстояние меньше нуля ( $f < 0$ ).

Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, называется **оптической силой**:

$$D = \frac{1}{f} \quad (12.6)$$

Оптическая сила линзы измеряется в **диоптриях**:

$$[D] = \text{дптр}$$

**Одна диоптрия** — это оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

Оптическая сила линзы характеризует степень отклонения линзой проходящих через нее лучей. Чем сильнее отклоняются лучи от первоначального направления, тем большей считается оптическая сила. Для собирающей линзы, оптическая сила будет положительной, а для рассеивающей линзы она отрицательна.

**Оптическая сила линзы** определяется по формуле:

$$D = \frac{1}{f} = (n_{2,1} - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (12.7)$$

где  $D$  - оптическая сила линзы;

$f$  - фокусное расстояние;

$n_{2,1}$  - относительный показатель преломления вещества, из которого изготовлена линза;

$R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны сферических поверхностей линзы.

**Оптическая сила системы линз**, сложенных вплотную, определяется по формуле:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n, \quad (12.8)$$

где  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$  - оптические силы линз, входящих в систему.

Линзы используются для получения изображений. Изображения предметов, которые получаются с помощью линз, могут быть *действительными* и *мнимыми*.

Действительные изображения получаются сходящимися лучами в точках их пересечения. Если лучи расходятся после преломления в линзе, то их можно продолжить в противоположную сторону, где они пересекутся в одной точке. В этом случае изображение будет мнимым. Получение действительного и мнимого изображений показано на рисунке 12.5.



Рисунок 12.5

**Для построения изображения** каждой точки достаточно двух лучей. Такими лучами являются:

1) луч, проходящий через центр линзы (при прохождении через линзу этот луч практически не изменяет своего направления);

2) луч, падающий на линзу параллельно ее главной оптической оси (после преломления в линзе этот луч либо сам, если линза собирающая, либо своим продолжением в обратную сторону, если линза рассеивающая, проходит через главный фокус линзы).

Если расстояние от предмета до линзы превышает фокусное расстояние  $f$ , то лучи, идущие от точки  $A$ , после прохождения линзы пересекаются в точке  $A'$ , которая называется *действительным изображением*. Действительное изображение получается *перевернутым* (рисунок 12.5 а).

Если расстояние от предмета до линзы меньше фокусного расстояния  $f$ , то лучи, идущие от точки  $A$ , после прохождения через линзу расходятся и в точке  $A'$  сходятся их продолжения. Эта точка называется *мнимым изображением*. Мнимое изображение является *прямым* (рисунок 12.5 б).

Рассеивающая линза дает мнимое изображение предмета при всех его положениях.

*Линза, максимальная толщина которой значительно меньше радиусов обеих сферических поверхностей, называется тонкой.*

Формула тонкой линзы имеет вид:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (12.9)$$

где  $a$  - расстояние от предмета до линзы;

$b$  - расстояние от линзы до изображения;

$f$  - фокусное расстояние.

На практике линзы часто используют для получения увеличенных изображений.

*Линейным увеличением линзы* называется отношение линейного размера изображения  $A_1B_1$  к линейному размеру предмета  $AB$ :

$$\Gamma = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{b}{a}, \quad (12.10)$$

Линзы входят в состав многих оптических приборов, используемых в ветеринарной медицине, таких как микроскопы, эндоскопы, гастроскопы и др.

### **Недостатки линз и их устранение**

Основными недостатками линз являются: сферическая абберация, дисторсия, хроматическая абберация и астигматизм.

*Сферическая абберация* обусловлена тем, что крайние (периферические) части линзы сильнее отклоняют лучи, идущие от точечного источ-

ника, чем ее центральная часть. В результате этого периферическая и центральная области линзы формируют различные изображения точечного источника  $S_1$ . Поэтому при любом положении экрана изображение на нем получается в виде светлого пятна.

Этот вид аберрации устраняется при использовании системы линз, состоящей из вогнутой и выпуклой линзы.

**Дисторсия изображения (искажение)** обусловлена тем, что при значительных углах падения лучей на линзу линейное увеличение для точек предмета, которые находятся на различных расстояниях от главной оси линзы, несколько различается. В связи с этим прямые контуры предмета в изображении принимают дугообразную форму.

Устраняется дисторсия при помощи сочетания данной линзы с одной или несколькими другими линзами, аберрации которых имеют противоположный характер.

**Хроматическая аберрация** проявляется в том, что пучок белого света, исходящий из точки, дает ее изображение в виде радужного круга, фиолетовые лучи пересекаются ближе к линзе, чем красные.

Причина хроматической аберрации заключается в зависимости показателя преломления вещества от длины волны падающего света (дисперсия). Для исправления этой аберрации в оптике используют линзы, изготавливаемые из стекол с разной дисперсией.

**Астигматизм** имеет место в результате неодинакового преломления лучей, проходящих через линзу в различных плоскостях. Изображение, которое дает такая линза, имеет вид пятна, вытянутого по определенному направлению, а контуры изображения предмета теряют резкость. Для исправления астигматизма применяются оптические системы, состоящие из нескольких линз, астигматизм которых взаимно компенсируется.

### 12.3. Микроскоп. Ход лучей в микроскопе. Увеличение и разрешающая способность микроскопа

Оптические приборы весьма многочисленны и разнообразны, их используют в различных областях науки, техники и в быту.

Простейшим оптическим прибором для увеличения угла зрения является лупа, представляющая собой короткофокусную собирающую линзу ( $f = 1-10$  см).

Большее увеличение можно осуществить, рассматривая при помощи лупы действительное изображение предмета, создаваемое другой линзой или системой линз. Такое оптическое устройство реализовано в микроскопе. Лупу в этом случае называют *окуляр*ом, а другую линзу - *объектив*ом.

**Микроскоп** – оптический прибор, предназначенный для увеличения и наблюдения малых объектов, невидимых невооруженным глазом. Микроскоп состоит из механической и оптической части.

На рис. 12.6 показана оптическая схема и построение изображения предмета в микроскопе.



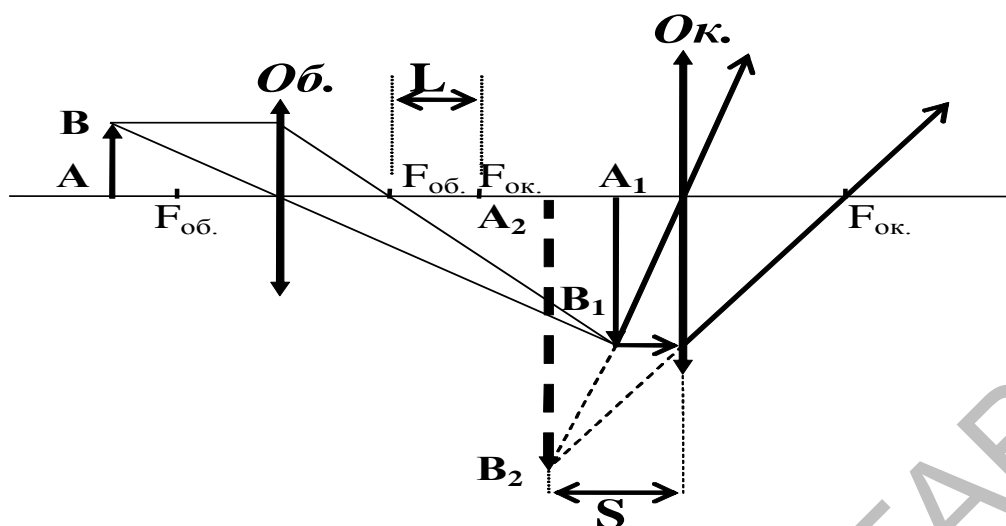


Рисунок 12.6

Для построения изображения в микроскопе предмет располагают между фокусом и двойным фокусом объектива. Используя два основных луча, получают промежуточное изображение  $A_1B_1$ , которое является увеличенным, перевернутым и действительным. Оно расположено между окуляром и его фокусом. Затем необходимо построить изображение промежуточного изображения  $A_1B_1$  в окуляре, при этом тоже используют два основных луча.

Окончательное изображение предмета  $A_2B_2$  является увеличенным, мнимым и перевернутым относительно предмета  $AB$ .

Увеличение микроскопа показывает, во сколько раз размер изображения больше размера предмета:

$$k = \frac{|A_2B_2|}{|AB|}$$

Умножив и поделив равенство на  $A_1B_1$ , получим:  $k = \frac{|A_2B_2| |A_1B_1|}{|AB| |A_1B_1|}$

Так как линейное увеличение окуляра  $k_{ок} = \frac{|A_2B_2|}{|A_1B_1|}$ , а линейное увеличение объектива  $k_{об} = \frac{|A_1B_1|}{|AB|}$ , то увеличение микроскопа:

$$k = k_{ок} \cdot k_{об} \quad (12.11)$$

С другой стороны увеличение объектива и окуляра можно определить:

$$k_{об} = \frac{L}{f_{об}} \text{ и } k_{ок} = \frac{S}{f_{ок}} \quad (12.12)$$

Подставив выражения (12.12) в формулу (12.11), получим еще одну формулу увеличения микроскопа:

$$k = \frac{L \cdot S}{f_{об} \cdot f_{ок}}, \quad (12.13)$$

где  $L$  - длина тубуса микроскопа;  
 $S=0,25$  м – расстояние наилучшего зрения.

Одной из важнейших характеристик микроскопа является **предел разрешения микроскопа ( $Z$ )** - *наименьшее расстояние между двумя точками предмета, при котором они различимы как отдельные объекты* (т.е. воспринимаются в микроскопе как две точки).

*Величина, обратная пределу разрешения, называется разрешающей способностью.*

Чем меньше предел разрешения, тем больше разрешающая способность.

Разрешающая способность тем больше, чем меньше длина волны используемого света и чем больше числовая апертура объектива.

*Апертурный угол  $\theta$ , равный половине угла, под которым видны края объектива от центра предмета.*

Предел разрешения численно равен отношению длины световой волны к синусу апертурного угла объектива:

$$Z = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (12.14)$$

Улучшить разрешающую способность, то есть уменьшить  $Z$ , микроскопа можно внесением между объективом и объектом иммерсионной жидкости с показателем преломления  $n=1,5-1,6$ .

При использовании иммерсионного объектива значительно увеличивается яркость изображения и повышается разрешающая способность микроскопа.

Предел разрешения иммерсионного микроскопа определяется по формуле:

$$Z = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin \theta} \quad (12.15)$$

Минимальное разрешение глаза составляет  $0,1 \dots 0,2$  мм. С помощью оптического микроскопа можно добиться разрешения до  $0,20$  мкм. Для того, чтобы эти объекты были различимы глазом, увеличение микроскопа должно быть не меньше величины, определяемой отношением предметов разрешения глаза  $Z_{чел}$  и микроскопа  $Z_m$ .

Предел разрешения глаза  $Z_{чел}=75$  мкм, тогда увеличение микроскопа будет равно:

$$k_m \geq \frac{Z_{\text{цел}}}{Z_m} = \frac{75}{0,2-0,3} \approx 250 \div 400$$

Такое увеличение называют полезным увеличением микроскопа.

#### 12.4. Фотометрические характеристики источников света. Закон освещенности

Электромагнитное излучение, как и любые волны, при своем распространении в какой-либо среде переносит энергию от точки к точке. *Раздел оптики, изучающий энергетические характеристики оптического излучения, называется фотометрией.*

*Количество энергии, излучающейся в единицу времени, называется потоком излучения или лучистым потоком.*

Измеряется поток излучения в *ваттах* (Вт).

Основной величиной в системе световых измерений является *световой поток*  $\Phi$ .

*Световой поток  $\Phi$  характеризует (по зрительному ощущению) световую энергию, переносимую через какую-либо площадку в единицу времени:*

$$\Phi = \frac{W_{\text{св}}}{t} \quad (12.16)$$

*Световой поток – это мощность светового излучения, оцениваемая визуально.*

Единицей измерения светового потока в СИ является *люмен*:

$$[\Phi] = \text{лм}$$

Световой поток  $\Phi$  всегда создается каким-либо источником света.

Все источники света делятся на *точечные* и *протяженные*.

Источник света считается *точечным*, если его размер мал по сравнению с расстоянием до места наблюдения при условии, что он испускает свет равномерно по всем направлениям.

Величина, которая характеризует зависимость светового потока, испускаемого источником света от направления излучения, называется *силой света*  $I$ .

*Сила света  $I$  – величина, численно равная световому потоку, излучаемому в единичном телесном угле:*

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (12.17)$$

В СИ единицей силы света является *кандела*:

$$[I] = \text{кд}$$

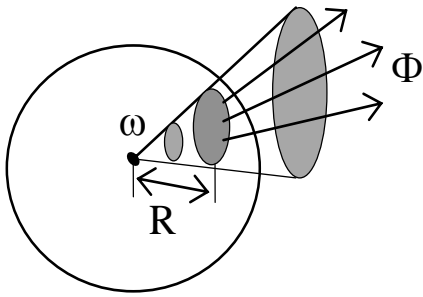


Рисунок 12.7

**Телесным углом** называется часть пространства, ограниченная конической поверхностью (рисунок 12.7).

Телесный угол определяется по формуле:

$$\omega = \frac{S}{R^2}, \quad (12.18)$$

где  $S$  - площадь основания, являющаяся частью сферической поверхности;

$R$  - радиус сферы.

Единицей измерения телесного угла является **стерадиан**:

$$[\omega] = \text{ср}$$

**Полный телесный угол**, охватывающий все пространство вокруг источника света, равен

$$\omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$$

Световой поток внутри полного телесного угла (полный световой поток) равен:

$$\Phi = I\omega = 4\pi I \quad (12.19)$$

От источника света световой поток падает на другие тела, отражается и, попадая в глаз человека, позволяет их видеть. Величину, характеризующую различную видимость отдельных тел и обусловленную величиной падающего на них светового потока, называют **освещенностью**.

**Освещенность  $E$**  – это величина, равная световому потоку, приходящемуся на единицу площади освещаемой поверхности:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (12.20)$$

Единицей измерения освещенности в СИ является **люкс** :

$$[E] = \text{лк}$$

**Люксом** называют освещенность такой поверхности, на каждый квадратный метр которой равномерно падает световой поток в один люмен.

Приведем несколько общепринятых показателей освещенности: лето, день под безоблачным небом - 100 000 люкс; уличное освещение - 5-30 люкс; полная луна в ясную ночь - 0,25 люкс.

Наблюдения показывают, что освещенность, создаваемая точечным источником света, зависит от *силы света*  $I$  этого источника, от *расстояния*  $R$  от источника до освещаемой поверхности и от *угла падения световых лучей* (угол между падающим лучом и перпендикуляром к этой поверхности). Эти величины связаны **законом освещенности**:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha , \quad (12.21)$$

где  $I$  - сила света,

$R$  - расстояние от источника до освещаемой поверхности,

$\alpha$  - угол падения луча.

Для характеристики протяженных источников вводятся величины: *светимость* и *яркость*.

Светимость используется для оценки световой энергии, излучаемой светящейся поверхностью.

**Светимость  $M$**  – величина, равная световому потоку, излучаемому с единицы площади поверхности источника по всем направлениям:

$$M = \frac{\Phi}{S} \quad (12.22)$$

Светимость измеряется в **люменах на метр квадратный**:

$$[M] = \text{лм/м}^2$$

Для характеристики светового потока, излучаемого светящейся поверхностью в определенном направлении, используют понятие *яркости*.

**Яркость  $B$**  – величина, равная световому потоку, излучаемому площадкой единичной площади в перпендикулярном к ней направлении в пределах единичного телесного угла:

$$B = \frac{\Phi}{\omega \cdot S_n} \quad (12.23)$$

Учитывая, что  $\Phi/S=I$ , формулу (12.22) можно записать в виде:

$$B = \frac{I}{S} \quad (12.24)$$

Единицей измерения яркости в СИ является **нит**:

$$[B] = \text{нт}$$

Наименьшая различимая глазом яркость имеет порядок  $10^{-6}$  нит, а яркость более  $10^5$  нит вызывает болезненное ощущение в глазу и может повредить зрение.

Физиологическое действие света на человека и животных в значительной степени зависит от освещенности. При малых освещенностях глаз с трудом различает мелкие предметы и быстро устает при чтении. При больших освещенностях свет оказывает вредное действие на фоторецепторные клетки, находящиеся в заднем слое сетчатки и раздражающее действие на нервные волокна глаза. Рациональное распределение освещенности в помещениях играет большую роль в повышении производительности труда и в увеличении продуктивности сельскохозяйственных животных. При обследовании или расчетах искусственного освещения животноводческих помещений устанавливают его интенсивность, равномерность, отсутствие слепящего действия, указывают вид источников света, их мощность, расположение и высоту подвески. Интенсивность искусственного освещения определяют с помощью люксометров и, сравнивая полученную освещенность с нормативами, делают вывод о его достаточности.

## Тема №13. Волновая оптика

### 13.1. Шкала электромагнитных волн. Интерференция света. Условия интерференционного максимума и минимума

Все электромагнитные волны имеют общую природу и отличаются друг от друга только длиной волны или частотой.

В соответствии с условиями возбуждения и свойствами излучения электромагнитные волны делятся по длине волны или частоте на несколько диапазонов, составляющих шкалу электромагнитных волн (рисунок 13.1).

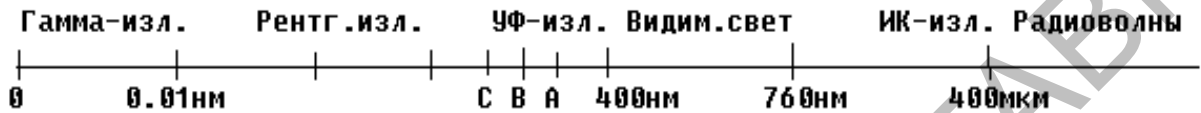


Рисунок 13.1

Радиоволны генерируют с помощью вибраторов различных конструкций.

Инфракрасное излучение (ИК), видимый свет и ультрафиолетовое излучение (УФ) испускают тела, нагретые до различных температур. Чем выше температура, тем короче длина волны испускаемых электромагнитных волн.

Рентгеновское излучение возникает при торможении быстрых электронов в электрическом поле ядра атомов вещества (тормозное) или при перестройке электронных оболочек атомов при ионизации и возбуждении атомов и молекул (характеристическое).

Гамма-излучение возникает при радиоактивном распаде ядер природных и искусственных радионуклидов.

**Волновая оптика** – раздел оптики, который изучает волновую природу света.

Свет имеет электромагнитную природу, и распространение света – это распространение электромагнитных волн.

Волновые свойства света проявляются в явлениях интерференции, дифракции, поляризации и др.

**Интерференцией** света называется сложение световых волн в пространстве, в результате которого в разных его точках образуется усиление или ослабление амплитуды (интенсивности) результирующей волны.

Интерференция света возникает от согласованных, когерентных источников.

**Когерентными** называются волны, которые имеют одинаковую частоту и постоянную разность фаз.

В природе когерентных источников не существует, поэтому когерентные волны получают разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно получить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел.

Пусть от когерентных источников света  $S_1$  и  $S_2$  распространяются волны. В некоторой точке эти волны накладываются друг на друга. В результате, происходит перераспределение энергии - в одних точках энергия волны (амплитуда) увеличивается, а в других - уменьшается. Это и есть интерференция. Такое пространственное распределение амплитуды результирующей волны с чередующимися максимумами и минимумами называется *интерференционной картиной*.

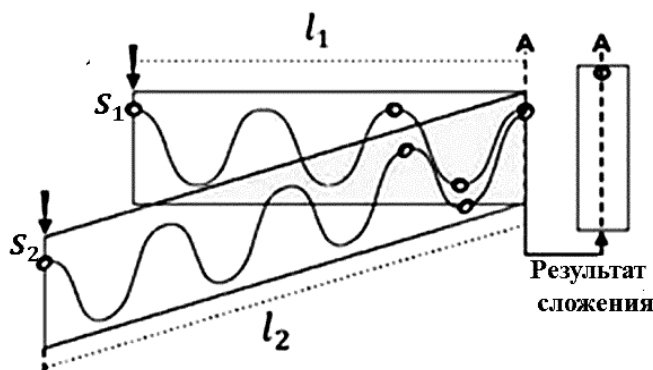


Рисунок 13.2

При наблюдении на экране видно чередование светлых и темных полос (рисунок 13.2).

Наличие максимумов или минимумов в данной точке зависит от *оптической разности хода волн  $\Delta l$* .

Если две интерферирующие волны испускаются одним источником света, то *разность хода* - это гео-

*метрическая разность длин путей ( $l_1$  и  $l_2$ ), по которым два интерферирующих луча от источника достигли одной точки экрана:*

$$\Delta l = l_2 - l_1 \quad (13.1)$$

*Максимум интенсивности при интерференции наблюдается тогда, когда оптическая разность хода равна целому числу длин волн (четному числу длин полуволн):*

$$\Delta l = k \cdot \lambda = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (13.2)$$

где  $\lambda$  - длина волны;

$k$  - целое число, определяющее порядок максимума.

*Минимум интенсивности при интерференции наблюдается тогда, когда оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволн:*

$$\Delta l = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (13.3)$$

Образование когерентных волн и интерференции можно наблюдать при попадании света на тонкую прозрачную пластину или пленку (рисунок 13.3). Пусть на плоскопараллельную пластинку падает пучок света. В точке  $A$  луч частично отражается (луч  $AD$ ), частично преломляется (луч  $AB$ ). Преломленный луч частично отражается от нижней границы пластинки в точке  $B$  и, преломившись в точке  $C$ , выйдет в первую среду. Эти два луча



образованы от одного луча, поэтому они когерентны и будут интерферировать.

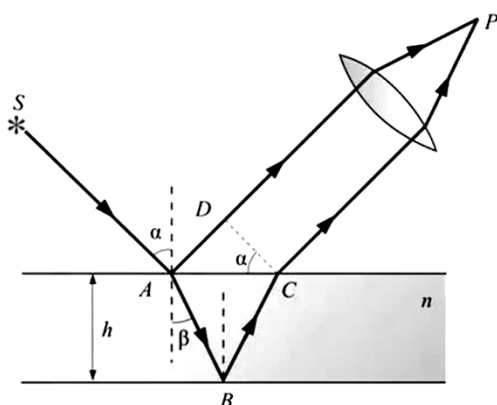


Рисунок 13.3

Разность хода лучей в пленке равна:

$$\Delta l = (|AB| + |BC|) \cdot n - (|CD| + \frac{\lambda}{2})$$

Если выполняется условие (13.2), то оба луча максимально усилят друг друга и вся поверхность пленки будет яркой.

Если выполняется условие (13.3), то все отраженные лучи взаимно погасятся, и вся поверхность пленки будет казаться темной.

Наблюдаемое в природе радужное окрашивание тонких пленок (масляные пленки на воде, мыльные пузыри, оксидные пленки на металлах) объясняются интерференцией, возникающей в результате отражения света от передней и задней поверхностей пленки.

Законы интерференции в тонких пленках лежат в основе просветления оптики. В оптических приборах на поверхность линз наносят пленки с показателем преломления иным, чем у линзы. Толщина пленок подбирается таким образом, чтобы выполнялся минимум интерференции в отраженном свете. Это приводит к значительному уменьшению потерь света на отражение, улучшению качества изображения и устраняет блики на поверхности линз.

Интерференцию света используют в **интерферометрах** - приборах, с помощью которых определяют показатели преломления различных веществ с высокой степенью точности (интерференционный рефрактометр, интерференционный микроскоп).

### 13.2. Дифракция света. Формула дифракционной решетки

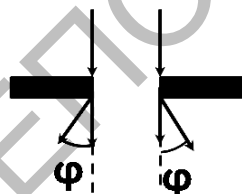


Рисунок 13.4

**Дифракция** – это явление огибания светом малых препятствий (неоднородностей среды).

В общем смысле дифракцией называется любое отклонение распространения света от законов геометрической оптики.

В результате дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшие отверстия в экранах и т. д.

Возможность наблюдения дифракции зависит от соотношения длины волны и размеров неоднородностей.

Угол, на который отклоняется луч от первоначального направления, называется **углом дифракции  $\varphi$**  (рисунок 13.4). Угол дифракции тем больше, чем больше длина волны и чем меньше толщина щели.

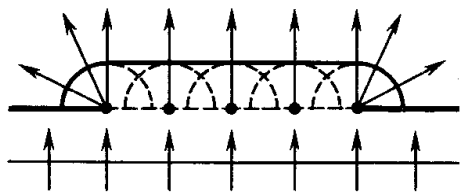


Рисунок 13.5

Явление дифракции объясняется на основании **принципа Гюйгенса – Френеля**: каждая точка среды, до которой дошла волна, является источником вторичных волн, которые являются когерентными и могут интерферировать между собой. Таким образом, результирующее колебание в некоторой точке пространства является результатом сложения элементарных вторичных волн, излучаемых каждым элементом некоторой волновой поверхности (рисунок 13.5).

Возникающая при этом дифракционная картина представляет собой чередующиеся максимумы и минимумы интенсивности света (рисунок 13.6).

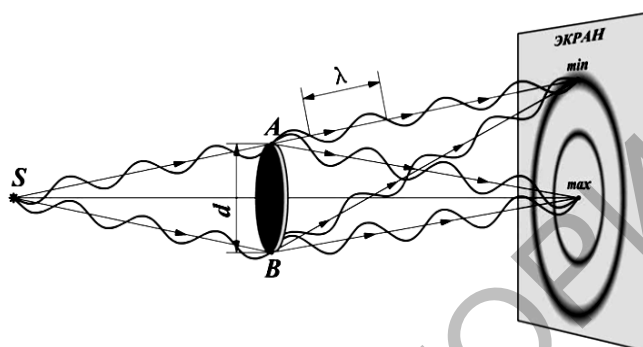


Рисунок 13.6

Дифракционная картина часто возникает в естественных условиях, например цветные кольца, окружающие источник света, наблюдаемые сквозь туман, обусловлены дифракцией света на водяных каплях.

Наблюдать четкую дифракционную картину можно при помощи **дифракционной решетки**.

**Дифракционная решетка** – это оптическое устройство, представляющее собой совокупность большого числа узких параллельных щелей, разделенных непрозрачными для света промежутками.

Дифракционную решетку можно получить нанесением непрозрачных царапин (штрихов) на стеклянную пластину, при этом щели будут пропускать свет, а штрихи – рассеивают и не пропускают свет.

Если ширина прозрачной щели  $a$ , а ширина непрозрачных промежутков  $b$ , то величина  $d = a + b$  называется **периодом дифракционной решетки**.

Пусть на дифракционную решетку падает пучок параллельных лучей перпендикулярно плоскости решетки (рисунок 13.7). При прохождении света через дифракционную решетку образуются когерентные вторичные волны, которые распространяются по всем направлениям и наблюдается дифракция. За решеткой помещают собирающую линзу, в фокусе которой располагается экран. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление

(max) и ослабление (min). На экране в месте наложения лучей будет наблюдаться дифракционная картина. Результирующее колебание в точке  $P$  определяется интерференцией вторичных волн от всех щелей и зависит от разности хода волн.

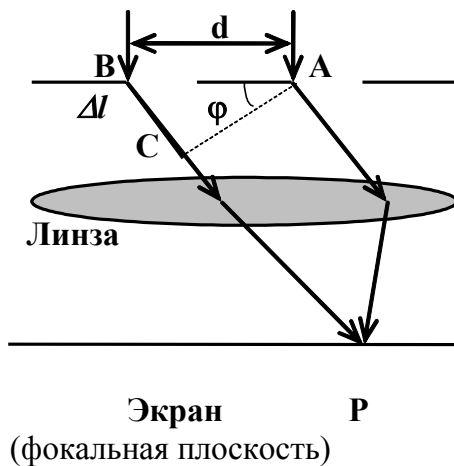


Рисунок 13.7

и (13.4), получим условия максимума и минимума для интерференции света на дифракционной решетке.

**Условие максимума:** максимумы будут наблюдаться в направлении тех углов, для которых на разности хода укладывается целое число длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi_{\max} = k \cdot \lambda, \quad (13.5)$$

где число  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$  называется **порядком спектра**.

Если  $k = 0$ , то будет центральный максимум. Формулу (13.5) называют **формулой дифракционной решетки**.

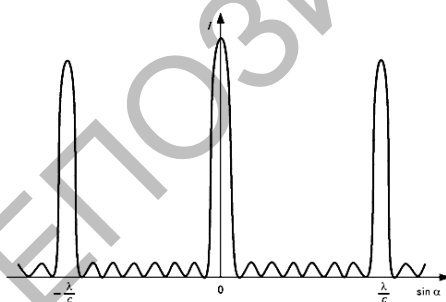


Рисунок 13.8

Каждая щель дифракционной решетки создает свою собственную дифракционную картину со своими максимумами и минимумами. Поэтому между каждыми двумя главными максимумами располагаются добавочные максимумы и минимумы (рисунок 13.8).

Рассмотрим треугольник ABC.

$BC = \Delta l$  - разность хода лучей.

$AB = d$  - постоянная дифракционной решетки.

$$\text{Тогда } \sin \varphi = \frac{BC}{AB} = \frac{\Delta l}{d}$$

Отсюда следует, что оптическая разность хода волн равна:

$$\Delta l = d \cdot \sin \varphi \quad (13.4)$$

В зависимости от разности хода лучей в точке  $P$  может наблюдаться max или min света.

Сопоставляя формулы (13.2), (13.3)

**Условие дифракционного минимума:** минимум будет наблюдаться в направлении тех углов, для которых на разности хода укладывается нечетное число длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi_{\min} = (2k + 1) \cdot \lambda / 2 \quad (13.6)$$

Если на решетку падает белый свет, то направления, при которых наблюдаются максимумы для разных длин волн, будут различными, что очевидно из формулы (13.5). Поэтому при дифракции произойдет разложение белого света в спектр. На месте каждого максимума, кроме центрального, будет сплошной спектр, обращенный фиолетовым концом к центру.

### 13.3. Поляризация света. Законы Малюса и Брюстера. Вращение плоскости поляризации оптически активными веществами

Электромагнитная волна является поперечной. Колебания вектора напряженности электрического поля  $E$  и вектора индукции магнитного поля  $B$  в электромагнитной волне происходят в перпендикулярных к направлению распространения волны плоскостях (рисунок 13.9).

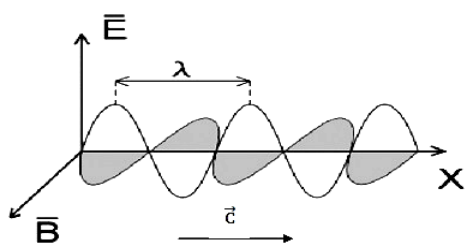


Рисунок 13.9

Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями электрического вектора. Поэтому его принято называть *световым вектором*, а плоскость его колебаний – *плоскостью колебаний волны*.

**Естественный свет** - это совокупность световых волн со всевозможными направлениями колебания светового вектора.

Излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых его атомами. Одновременно испускают энергию множество атомов по всевозможным направлениям независимо друг от друга.

Из естественного света с помощью специальных устройств можно получить свет с одинаковой ориентацией всех световых векторов. Такой свет называют *поляризованным*.

Свет, в котором имеется единственное направление колебаний вектора  $E$ , называют **плоско поляризованным**, а свет, в котором имеется преимущественное направление колебаний вектора, но при этом имеются и другие направления колебаний, называют **частично поляризованным** (рисунок 13.10).

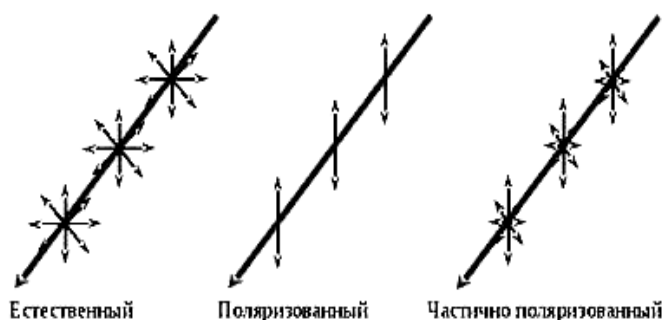


Рисунок 13.10

**Поляризация** – это процесс ориентации колебаний в поперечной волне в определенных направлениях.

Устройство, позволяющее получать поляризованный свет из естественного, называют **поляризатором**.

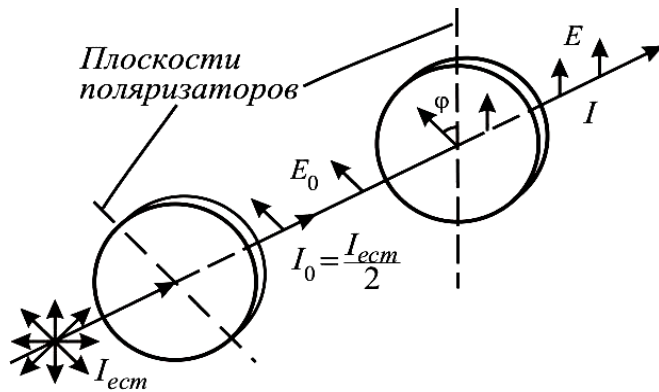


Рисунок 13.11

При этом интенсивность света уменьшается в 2 раза:

$$I = \frac{I_0}{2} \quad (13.7)$$

Если на пути луча поляризованного света поставить анализатор и поворачивать его вокруг луча, то интенсивность выходящего света будет меняться от некоторого максимального значения  $I_0$  до нуля.

Интенсивность света, прошедшего через анализатор, определяется по **закону Малюса**: интенсивность света, вышедшего из анализатора  $I$ , прямо пропорциональна интенсивности света, падающего на анализатор  $I_0$  и косинусу квадрата угла между оптической осью анализатора и поляризатора

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi \quad (13.8)$$

Таким образом, поворот анализатора относительно поляризатора сопровождается изменением интенсивности света на экране: максимум интенсивности наблюдается при  $\varphi = 0$ , а минимум, соответствующий полному гашению света, при  $\varphi = 90^\circ$ .

Причины поляризации света могут быть различными, но наиболее часто поляризация наблюдается: при прохождении света через некоторые кристаллы (турмалин, шпат и др.); при отражении и преломлении света на границе раздела двух диэлектриков; при двойном лучепреломлении света.

При падении светового луча на границу раздела двух изотропных диэлектриков (например, воздуха и стекла) он частично отражается, а частично проникает во вторую среду. При этом оба луча оказываются частично поляризованными. Степень поляризации зависит от угла падения лучей и показателя преломления. При некотором угле падения отраженный луч будет поляризован полностью, а степень поляризации преломленного луча будет максимальна (рисунок 13.12).

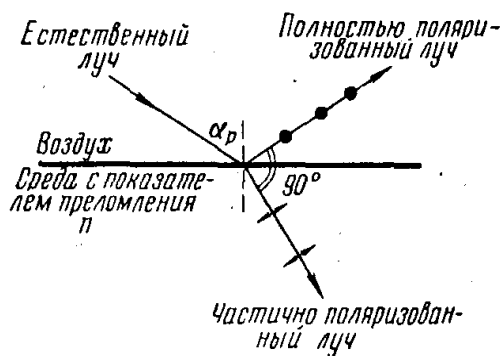


Рисунок 13.12

Этот угол называется *углом Брюстера* (угол полной поляризации) и обозначается  $\alpha_p$ . Его значение можно рассчитать по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_p = n \quad (13.9)$$

Формула (13.9) описывает **закон Брюстера**: тангенс угла падения  $\alpha_p$  при полной поляризации отраженного луча равен относительному показателю преломления отражающей среды.

Явление двойного лучепреломления, то есть раздваивания каждого падающего светового пучка, наблюдается при переходе света из изотропной среды в анизотропную. При этом оба луча оказываются полностью поляризованными. Оптической анизотропией обладают многие кристаллы из-за асимметрии их решеток (например, исландский шпат).

Во многих случаях при прохождении плоскополяризованного света через вещество происходит поворот плоскости поляризации относительно своего исходного положения. Это явление называют *оптической активностью вещества* или *вращением плоскости поляризации*, а сами вещества называют **оптически активными веществами**. К ним относятся кристаллические тела (например, кварц), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ (раствор сахара, глюкозы, меда и другие).

Вещества, поворачивающие плоскость колебаний по часовой стрелке, называются **правовращающими**, а вещества, поворачивающие эту плоскость против часовой стрелки, – **левовращающими**. Многие оптически активные вещества существуют в двух разновидностях – правовращающие и левовращающие. Отметим, что свойством оптической активности обладают все органические молекулы живых организмов, причем они существуют в одной из двух модификаций: либо правые, либо левые. Например, все молекулы ДНК имеют свойства правой спирали.

Вращение плоскости колебаний поляризованного света обусловлено особенностями структуры оптически активных веществ – ассиметричным строением молекул.

В растворах угол поворота плоскости поляризации пропорционален пути света в растворе и концентрации активного вещества:

$$\varphi = \alpha \cdot c \cdot l, \quad (13.10)$$

где  $\alpha$  - удельное вращение,  
 $c$  - концентрация оптически активного вещества,  
 $l$  - толщина слоя вещества.

Обычный, неполяризованный свет от источника проходит через поляризатор, и уже плоско-поляризованный свет проходит через трубку с исследуемым оптически-активным веществом. В результате плоскость поляризации света поворачивается на некоторый угол  $\alpha$ , который и можно определить, поворачивая анализатор поляриметра, расположенный за трубкой с исследуемым веществом. Таким образом, измерив угол  $\alpha$ , можно рассчитать концентрацию оптически-активного вещества по формуле:

$$c = \frac{\varphi}{\alpha \cdot l} \quad (13.11)$$

Соответствующие измерительные приборы называются *поляриметрами*, или *сахариметрами* (если они специально приспособлены для измерения концентрации сахара).

Принцип работы поляриметра показан на рисунке 13.13.

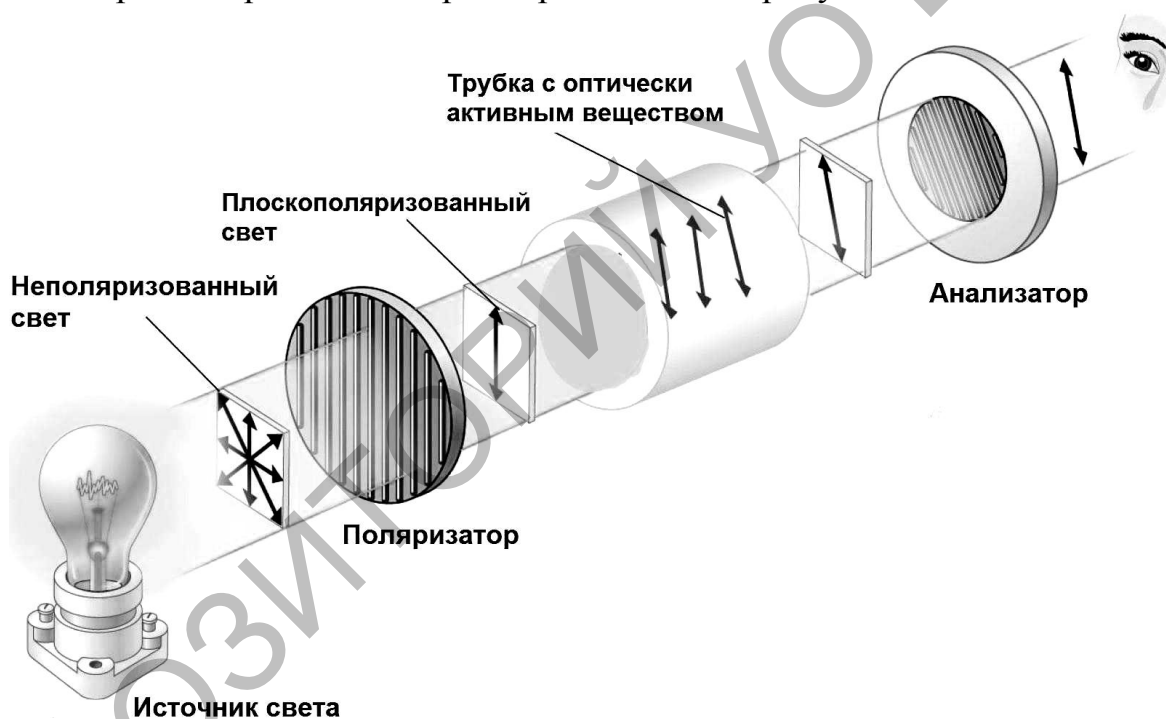


Рисунок 13.13

Этот метод используют для определения оптической активности сывороточных белков с целью диагностики рака, для определения содержания сахара в крови и в моче, в биофизических исследованиях, а также в пищевой промышленности.

В ветеринарно-биологических исследованиях поляриметры применяют для определения сахаров и крахмала в растительных кормах, белков и аминокислот в растворах, при определении активности ферментов, расщепляющих углеводы и другие вещества.

**Тема №14. Взаимодействие света с веществом.  
Квантово-оптические явления**

**14.1. Дисперсия света. Спектры и их виды. Спектральный анализ**

*Дисперсией* называется зависимость показателя преломления от частоты или длины световой волны.

Дисперсию можно объяснить с точки зрения электромагнитной теории. Так как скорость света в вакууме не зависит от частоты, а дисперсия возникает только в веществе, то она связана со строением вещества. Так как атомы и молекулы сами могут являться источниками колебаний, то при воздействии на них световой волны в веществе возникают вынужденные электромагнитные колебания. Атомы начинают излучать электромагнитные волны, которые накладываются на внешнюю волну. Частоты вынужденных колебаний совпадают с частотой внешней волны, но их фазы могут отличаться (в зависимости от структуры частиц вещества, от их ориентации и т.д.). Это приводит к тому, что скорости прохождения суммарных волн через данное вещество будут неодинаковыми.

Дисперсия света характеризуется функцией, которая описывает зависимость показателя преломления от частоты (или длины волны)  $n=f(\nu)$  для данного вещества.

По закону преломления  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$ , а т.к.  $v_1 = \lambda_1 \nu$ , а  $v_2 = \lambda_2 \nu$ ,

то отсюда следует, что:  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 \nu}{\lambda_2 \nu} = \frac{n_2}{n_1}$

В результате получим функцию нормальной дисперсии:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (14.1)$$

*Дисперсия называется нормальной, если показатель преломления возрастает с уменьшением длины волны.*

Такой дисперсией обладают бесцветные прозрачные среды.

В мутных и окрашенных средах наблюдается *аномальная дисперсия*, для которой показатель преломления возрастает с увеличением длины волны света.

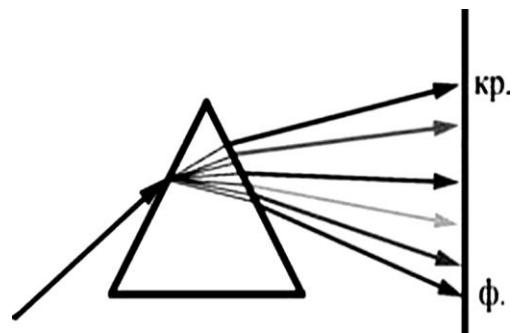


Рисунок 14.1



В результате дисперсии луч белого света, проходя через призму, раскладывается на составляющие его монохроматические лучи. Попадая на экран, эти лучи образуют спектр, т.е. совокупность разноцветных полос (рисунок 14.1).

***Спектром** называют совокупность простых волн, составляющих данное сложное излучение.*

Спектры делятся на *спектры излучения и поглощения*.

*Спектры, образуемые излучением нагретых тел, называются **спектрами излучения**.*

Спектры излучения бывают трех видов: сплошные, линейчатые и полосатые.

***Сплошной спектр** состоит из всех спектральных цветов, плавно переходящих друг в друга. Сплошной спектр дают раскаленные твердые вещества и жидкости.*

***Линейчатый спектр** состоит из отдельных цветных линий, разделенных темными промежутками. Линейчатые спектры характерны для одноатомных газов (например: инертных газов, паров металлов).*

***Полосатый спектр** представляет собой множество тесно расположенных между собой спектральных линий, образующих группы, – полосы, разделенные темными промежутками. Такой спектр дает многоатомные газы (например: кислород, углекислый газ, водяной пар и др.).*

Если белый свет пропустить через раскаленные пары или газы, то в сплошном спектре появятся черные линии (или полосы), которые соответствуют линиям (или полосам) в спектре излучения данного газа.

*Совокупность длин волн, поглощаемых данным веществом, называется **спектром поглощения**.*

Спектр поглощения обусловлен тем, что вещества поглощают только те длины волн, которые они сами излучают.

Исследование спектров имеет большое значение для определения химического состава и природы вещества.

*Метод качественного и количественного определения состава вещества по его спектру называется **спектральным анализом**.*

Основное преимущество спектрального анализа состоит в том, что для него требуется исключительно малое количество вещества.

Спектральный анализ применяется в ветеринарной санитарии и судмедэкспертизе, для определения качества продуктов, в биохимии, биофизике, геологии и других отраслях науки. Спектры позволяют исследовать не только строение молекул, но и характер межмолекулярного взаимодействия.

## **14.2. Поглощение света. Закон Бугера. Колориметрия**

При прохождении световой волны через вещество часть энергии волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов, частично переходит в энергию движения атомов, т.е. во внутреннюю энергию вещества.

Поэтому интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается – свет поглощается в веществе.

**Поглощение света** - уменьшение его интенсивности при прохождении через вещество вследствие превращения световой энергии в другие виды энергии.

Эффективность передачи энергии зависит от частоты падающего света: чем она ближе к собственной частоте колебаний электронов, тем выше поглощение.

Вещества, слабо поглощающие свет, называются **прозрачными**. Вещества, обладающие сильным поглощением, называются **непрозрачными**. Однако такое подразделение имеет относительный характер, поскольку прозрачность зависит не только от природы вещества, но и от толщины его слоя.

Для количественной оценки процесса поглощения света вводят понятие интенсивности света.

**Интенсивностью** света  $I$  называется отношение энергии  $W$ , переносимой светом через единицу площади  $S$ , перпендикулярной световому лучу, за единицу времени  $t$ :

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t} \quad (14.2)$$

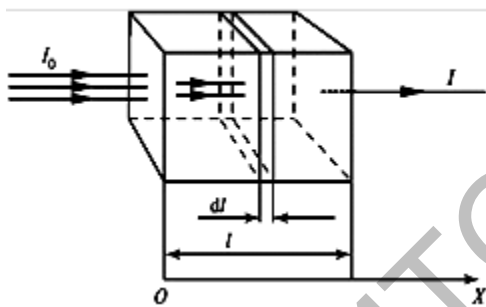


Рисунок 14.2

В СИ измеряется в **ваттах на квадратный метр**:

$$[I] = \text{Вт/м}^2$$

Предположим, что световая волна падает на пластину вещества, поглощающую свет (рисунок 14.2).

Ослабление интенсивности света будет прямо пропорционально толщине слоя  $l$ .

Интенсивность света при прохождении через вещество убывает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-kl}, \quad (14.3)$$

где  $I_0$  - интенсивность света, падающего на пластину;

$I$  - интенсивность света, вышедшего из пластины;

$l$  - толщина пластины;

$k$  – коэффициент поглощения вещества пластины.

Знак «минус» указывает на уменьшение интенсивности света в пластине.

Соотношение (14.3) носит название **закона Бугера**. Этот закон справедлив для всех веществ, а их индивидуальные поглощающие свойства

полностью определяются показателями поглощения  $k$  и являются одними из важнейших оптических характеристик вещества. Величина показателя поглощения вещества зависит от длины волны (частоты) падающего света.

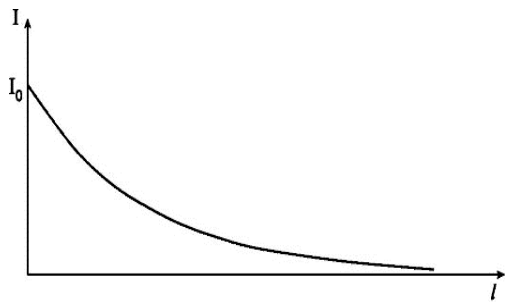


Рисунок 14.3

График зависимости интенсивности света от толщины поглощающего слоя представлен на рисунке 14.3.

Для растворов при небольших концентрациях справедлив **закон Бера**: *показатель поглощения раствора прямо пропорционален концентрации  $C$  поглощающего вещества*

$$k = \alpha \cdot C, \quad (14.4)$$

где  $\alpha$  – удельный показатель поглощения вещества.

Подставив выражение (14.4) в формулу (14.3), получим закон поглощения света для растворов:

$$I = I_0 e^{-\alpha C l} \quad (14.5)$$

Формула (14.5) называется **законом Бугера – Ламберта – Бера**.

Закон Бугера – Ламберта – Бера лежит в основе *концентрационной колориметрии – фотометрического метода определения концентрации поглощающего вещества в растворах*.

Для определения концентрации известного растворенного вещества на кювету с раствором направляют луч света и измеряют его интенсивности на входе в кювету  $I_0$  и на выходе из нее  $I$  и вычисляют концентрацию раствора.

*Фотоэлектроколориметр* используют в клинической практике, в частности для измерения насыщения крови кислородом, т.е. для определения количества оксигемоглобина.

### 14.3. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучения и их биологическое действие

Солнечное излучение — источник энергии, тепла и света на Земле. Благодаря солнечной радиации происходит нагревание поверхности земного шара, испарение воды, перемещение воздушных масс, изменение погоды. Она является основным фактором, обуславливающим климат местности.

Основную часть солнечного спектра составляют лучи с малой длиной волны, которая измеряется в нанометрах ( $\text{нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

Оптическая часть солнечного спектра делится на 3 диапазона:

- инфракрасное излучение — с длиной волны от 760 нм до 2 мм;

- видимый свет — от 400 нм до 760 нм;
- ультрафиолетовое излучение — от 400 нм до 10 нм.

При прохождении через воздушную оболочку Земли отражается и поглощается почти 60% энергии Солнца, до поверхности планеты доходит только 1% ультрафиолетовых лучей, около 40% видимых световых и 59% инфракрасных лучей.

Солнечная радиация оказывает мощное биологическое действие, стимулирует физиологические процессы в организме, изменяет обмен веществ и общий тонус организма.

Видимое излучение действует на организм рефлекторно через органы зрения и частично через нервные окончания в коже, что приводит к стимуляции фотохимических процессов, улучшению функции сердечно-сосудистой системы, оказывает влияние на состояние нервной системы, повышает функцию эндокринных органов. Недостаток света оказывает отрицательное действие на воспроизводительные функции животных. Освещение действует на деятельность половых желез у многих животных, на молочную продуктивность коров

Солнечное излучение обладает лечебными свойствами (гелиотерапия), используется как средство закаливания. Оно же может оказывать и негативное воздействие на организм (ожог, тепловой удар).

Инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение находят широкое применение в медицине и ветеринарии.

Наиболее сильное действие оказывают ультрафиолетовые лучи.

**Ультрафиолетовым (УФ)** называют электромагнитное излучение с длинами волн от 400 нм до 10 нм.

Его источником является Солнце и ртутные лампы. Первичное действие УФ излучения связано с фотохимическими реакциями, возникающими в тканях.

В соответствии с особенностями биологического действия выделяют следующие зоны УФ излучения:

**1 - длинноволновая область А** – содержит ультрафиолетовые лучи с длиной волны от 400 нм до 320 нм.

УФ излучение этой зоны обладает наименьшей биологической активностью. Действие лучей этой области способствует образованию в организме некоторого количества витамина *D*, вызывает слабую эритему и пигментацию кожи. Плюсом длинноволнового излучения области А является то, что оно хорошо проходит через оконные стекла, в отличие от других областей УФ излучения. Используется при лечении многих дерматологических заболеваний.

**2 - средневолновая область В** – относятся ультрафиолетовые лучи с длиной волны от 320 нм до 280 нм.

Данный вид ультрафиолетовых лучей обладает наибольшей биологической активностью. Они обладают сильным фотохимическим действием, оказывают витаминообразующее действие. Под влиянием УФ-лучей происходит образование витамина *D*, который способствует всасыванию из

кишечника и усвоению кальция, входящего в состав костей, что особенно важно для детей и молодняка с/х животных. При недостатке витамина *D* кальций, входящий в состав пищи, не усваивается и потребность в нем восполняется за счет кальция костей, что ведет к рахиту.

Кроме того, средневолновое УФ излучение вызывает наибольшую эритему и пигментацию кожи.

***3 - коротковолновая область С*** – включает в себя волны длиной от 280 до 180 нм.

Оказывает бактерицидное действие. При облучении происходит разрушение структуры микроорганизмов и грибов. Бактерицидное действие УФ излучения этой зоны используют для обеззараживания воздуха в закрытых помещениях: операционных, перевязочных, в промышленном птицеводстве, а также для дезинфекции различного инвентаря.

Бактерицидное действие УФ излучения широко используется для обеззараживания питьевой воды. При этом органолептические свойства воды не изменяются, в нее не вносятся посторонние химические вещества. С помощью бактерицидных ламп возможно проведение обеззараживания молока, дрожжей, безалкогольных напитков, что увеличивает сроки хранения этих продуктов и способствует сохранению их свежести.

Действие УФ зависит от дозы: слишком сильное облучение вредно для организма. Особенно неустойчивы к коротковолновому излучению активно делящиеся клетки. Как приспособление к экранированию организма от передозировки УФ у многих видов формируются темные пигменты, поглощающие эти лучи (такова, например, природа загара у человека). Воздействие избыточных доз ультрафиолетового облучения на организм в целом и на отдельные его органы приводит к возникновению ряда патологий. В первую очередь это относится к последствиям бесконтрольного загораживания: ожоги, пигментные пятна, повреждение глаз - развитие *фотоофтальмии*.

***Инфракрасное излучение (ИК)*** соответствует длинам волны от 760 нм до 2 мм.

Его источником является Солнце и любое нагретое тело (нагретый камень, керамические изделия и др.). В лечебной практике в качестве источников инфракрасного излучения используются специальные облучатели, например: лампа Минина, инфракрасные лампы, светотепловая ванна, лампа Соллюкс и т.д.

ИК излучение условно разделяют на ближнюю (0,76 - 2,5 мкм), среднюю (2,5 – 50 мкм) и дальнюю (50 - 2000 мкм) области. ИК излучение невидимо, хотя длительное воздействие его на глаза может вызвать отслоение сетчатки, катаракту и другие заболевания глаз.

Биологическое действие ИК излучения в основном определяется производимым им нагревом тканей. Повышение температуры активизирует деятельность клеток, ускоряет их размножение и обменные процессы.

Первичное действие ИК излучения на животное начинается с эффектов, происходящих в коже. Волосяной покров, роговой слой кожи, весь

эпидермис являются прозрачными для ИК излучения. Оно поглощается преимущественно в коже, но некоторая его часть (25-30%) проникает на глубину 2,5-4 см, достигая подкожного жирового слоя и даже расположенных под ним органов. Температура слоев кожи, в которых поглощается ИК излучение, повышается, что приводит к раздражению содержащихся в коже рецепторов. В них возникают биопотенциалы действия, поступающие в ЦНС, которая управляет механизмом терморегуляции. В результате в месте облучения возрастает количество циркулирующей крови, увеличивается снабжение ткани кислородом, а это приводит к активизации ее биологических функций.

Длинноволновое ИК излучение поглощается в верхних слоях тканей и вызывает в них гиперемия. Длинноволновые инфракрасные лучи имеют меньшую энергию, чем коротковолновые, обладают меньшей проникающей способностью, а поэтому полностью поглощаются в поверхностном слое кожи, нагревая ее. Непосредственно вслед за интенсивным нагреванием кожи возникает тепловая эритема, которая проявляется в покраснении кожи вследствие расширения капилляров.

Коротковолновое инфракрасное излучение проникает в ткани на глубину до 6-8 см, вызывая прогревание внутренних органов.

ИК излучение широко применяют в медицинской и ветеринарной физиотерапии. Его используют при лечении заболеваний кожи, лимфатической системы, суставов (артриты, ревматизм), плевритов, маститов и т.д.

ИК излучение, сильно поглощаясь водой, усиливает испарение и оказывает высушивающее действие на влажные поверхности. Это свойство используют при лечении мокнувших экзем, при отмороживании.

Большое распространение получили установки для ИК обогрева помещений, в которых находятся сельскохозяйственные животные, особенно молодняк. Также инфракрасное излучение применяется для сушки фруктов, овощей, влажного зерна.

#### **14.4. Тепловое излучение и его характеристики. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина**

*Тепловым излучением называется излучение электромагнитных волн, обусловленное тепловым движением атомов или молекул.*

Тепловое излучение обуславливается возбуждением частиц вещества при соударениях в процессе теплового движения или ускоренным движением зарядов (колебания ионов кристаллической решетки, тепловое движение свободных электронов и т.д.). Оно возникает при любых температурах и присуще всем телам.

Характерной чертой теплового излучения является сплошной спектр. Интенсивность излучения зависит от температуры тела, поэтому не всегда тепловое излучение воспринимается глазом как свечение. Например, тела, нагретые до высокой температуры, значительную часть энергии испускают

в видимом диапазоне, а при комнатной температуре почти вся энергия испускается в инфракрасной части спектра.

Тепловое излучение ведет к уменьшению внутренней энергии тела и, следовательно, к снижению температуры.

Однако, излучая, тело одновременно поглощает часть энергии, испускаемой другими телами, за счет чего внутренняя энергия тела увеличивается.

Постоянное испускание и поглощение энергии телами приводит к тому, что в изолированной системе устанавливается такая температура, при которой уменьшение энергии телом при излучении компенсируется ее увеличением при поглощении. Такого типа излучение называется *равновесным*.

### **Характеристики теплового излучения:**

**1. Спектральная излучательная способность тела** – величина, равная энергии, излучаемой с единицы площади поверхности тела за единицу времени, в данном интервале длин волн и при данной температуре:

$$E_{\lambda,T} = \frac{W}{S \cdot \Delta t} \quad (14.6)$$

В СИ измеряется в **ваттах на квадратный метр**:

$$[E_{\lambda,T}] = \text{Вт/м}^2$$

**2. Спектральной поглощательной способностью** тела называется величина, равная отношению энергии, поглощенной телом, ко всей падающей на него энергии, в данном интервале длин волн и при данной температуре:

$$A_{\lambda,T} = \frac{W_{\text{погл}}}{W_{\text{пад}}} \quad (14.7)$$

Спектральная поглощательная способность - величина безразмерная. Её значения лежат между нулем и единицей:  $0 \leq A_{\lambda,T} \leq 1$ .

Все реальные тела имеют  $A_{\lambda,T} < 1$ , так, например: для зрачка глаза -  $A=0,97$ ; для окна -  $A=0,94$ ; сажи -  $A=0,92$ .

Тело, которое при любой температуре поглощает полностью падающее на него излучение, называется **абсолютно черным телом**.

Его поглощательная способность при любых длинах волн и любой температуре  $A_{\lambda,T} = 1$ .

Спектральная излучательная способность абсолютно черного тела обозначается  $\varepsilon_{\lambda,T}$ .

**Абсолютно белое тело** - такое тело, коэффициент поглощения которого равен нулю для всех длин волн:  $A = 0$ .

Истинно белых тел в природе нет, однако существуют тела, близкие к ним по свойствам в достаточно широком диапазоне температур и длин волн. Например, зеркало в оптической части спектра отражает почти весь падающий свет.

Количественная связь между излучением и поглощением установлена Г. Кирхгофом.

**Закон Кирхгофа:** отношение спектральной излучательной способности тела к его спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела и равняется спектральной излучательной способности абсолютно черного тела в том же интервале длин волн и при той же температуре:

$$\frac{(E_{\lambda,T})_1}{(A_{\lambda,T})_1} = \frac{(E_{\lambda,T})_2}{(A_{\lambda,T})_2} = \dots = \frac{(E_{\lambda,T})_{\text{ачт}}}{(A_{\lambda,T})_{\text{ачт}}} = \varepsilon_{\lambda,T}, \quad (14.8)$$

где  $\varepsilon_{\lambda,T}$  - спектральная излучательная способность абсолютно черного тела.

Из закона Кирхгофа вытекает три следствия:

1. Спектральная излучательная способность любого тела прямо пропорциональна его спектральной поглощательной способности

$$E_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} \cdot A_{\lambda,T} \quad (14.9)$$

2. Спектральная излучательная способность любого тела меньше спектральной излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре

$$\varepsilon_{\lambda,T} > E_{\lambda,T} \quad \text{т.к.} \quad A_{\lambda,T} < 1 \quad (14.10)$$

3. Если тело не поглощает какие-либо длины волн, то оно эти же длины волн и не излучает.

Если  $A_{\lambda,T} = 0$ , то  $E_{\lambda,T} = 0$  и наоборот.

Австрийские физики Й. Стефан и Л. Больцман установили в 1879 году зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от температуры.

**Закон Стефана-Больцмана:** излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \sigma T^4, \quad (14.11)$$

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

Если излучающее тело не является черным, то

$$\varepsilon_{\lambda,T} = k \sigma T^4, \quad (14.12)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий излучательную способность тела.



Излучающее тело одновременно и поглощает излучение. Если излучающая и поглощающая поверхности имеют одинаковую площадь, то закон Стефана-Больцмана запишется в виде:

$$\varepsilon_{\lambda,T} = k\sigma(T_1^4 - T_2^4), \quad (14.13)$$

где  $T_1$  - температура излучающего тела;  
 $T_2$  - температура окружающей среды.

Спектр теплового излучения имеет максимум, который с увеличением температуры смещается в область коротких волн.

В 1896 г. немецкий физик В. Вин установил зависимость длины волны, на которую приходится максимум энергии в спектре абсолютного черного тела от температуры.

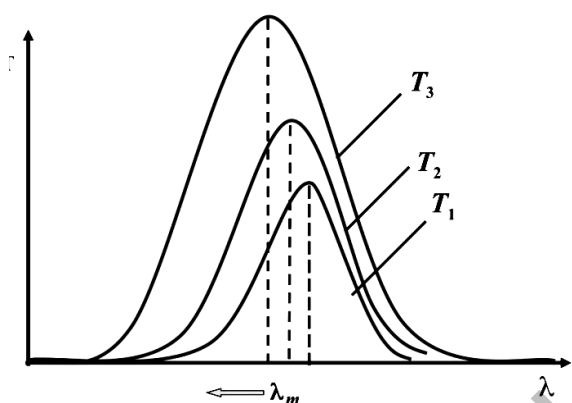


Рисунок 14.4

**Закон Вина:** длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна термодинамической температуре:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (14.14)$$

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

Закон Вина называют законом смещения, так как он показывает, что с повышением температуры максимум энергии излучения абсолютно черного тела смещается в сторону более коротких длин волн (рисунок 14.4).

В конце 19 столетия были сделаны попытки вывести теоретически закон распределения энергии в спектре абсолютно черного тела.

Законы классической физики не смогли объяснить экспериментальные результаты, полученные Вином. Задача была решена в 1900 г. Планком. Он высказал новую гипотезу о том, что свет излучается и распространяется дискретно, т.е. порциями, каждая из которых переносит определенное количество энергии, прямо пропорциональное частоте излучения.

Энергия кванта равна:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (14.15)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка.

Таким образом, Планк теоретически объяснил квантовый характер теплового излучения.

Тело человека постоянно излучает и поглощает тепловое излучение. Этот процесс зависит от температур тела человека и окружающей среды. Тепловое излучение тела человека относится к инфракрасному диапазону

электромагнитных волн. Регистрация теплового излучения человека лежит в основе диагностического метода – *термографии*.

**Термография** - диагностический метод, основанный на измерении и регистрации теплового излучения поверхности тела человека или его отдельных участков.

Для этой цели используют тепловизоры, которые преобразуют инфракрасное излучение в видимый свет. Излучение тела с помощью специального объектива проецируется на матрицу тепловизора. После преобразования на экране формируется детальный тепловой портрет. Участки с различными температурами отличаются цветом или интенсивностью. Современные методы позволяют фиксировать различие в температурах до 0,2 градуса.

Тепловые портреты используются в функциональной диагностике. Различные патологии внутренних органов могут образовывать на поверхности кожные зоны с измененной температурой. Обнаружение таких зон указывает на наличие патологии.

#### 14.5. Фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна

**Фотоэффект** – явление выбивания электронов из атомов или молекул вещества под действием электромагнитного излучения.

Впервые фотоэффект был обнаружен в 1887г. немецким физиком Г. Герцем, что явилось экспериментальным обоснованием квантовой теории света.

Если оторванные от своих атомов или молекул электроны остаются внутри вещества в качестве свободных носителей заряда, то фотоэффект называется **внутренним**.

Внутренний фотоэффект наблюдается в некоторых полупроводниках и в меньшей степени - у диэлектриков.

Если электроны, выбитые электромагнитным излучением, вылетают за пределы вещества, фотоэффект называют **внешним**.

Внешний фотоэффект наблюдается главным образом у металлов.

Явление внешнего фотоэффекта впервые было исследовано в 1890 г. русским физиком Столетовым А.Г.

Схема опытов Столетова по изучению внешнего фотоэффекта изображена на рисунке 14.5. В вакуумной трубке помещают отрицательно заряженный катод (К) и положительно заряженный анод (А), которые через потенциометр (П) подключены к источнику напряжения. Напряжение меж-

Схема установки:

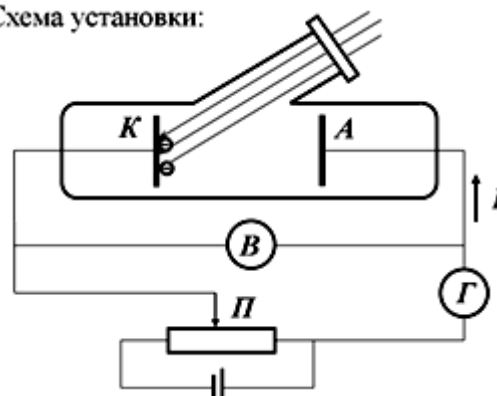


Рисунок 14.5

ду электродами измеряют вольтметром (В), ток в цепи - гальванометром (Г). При освещении катода через кварцевое окно свет вырывает из него электроны, называемые **фотоэлектронами**. Они устремляются к аноду. В цепи появляется ток, называемый **фототоком**. Величину фототока измеряют гальванометром.

По результатам измерений можно построить вольтамперную характеристику (рисунок 14.6). Из вольтамперной характеристики видно, что при некотором напряжении между анодом и катодом сила фототока перестает зависеть от напряжения – фототок достигает насыщения.

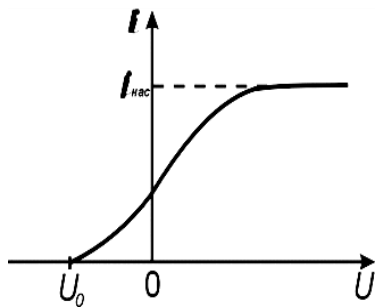


Рисунок 14.6

**Сила фототока насыщения  $I_{нас}$**  определяется количеством электронов, испускаемых катодом под действием света, в единицу времени.

Фотоэлектроны, испускаемые катодом, имеют различные начальные скорости, а значит и различные кинетические энергии. При уменьшении напряжения от 0 до  $-U_0$  фототок постепенно уменьшается и при напряжении  $U = -U_0$  полностью прекращается (рисунок 14.6).

**Задерживающим напряжением  $U_0$**  называется напряжение, при котором величина силы фототока  $I$  равна нулю.

Согласно теореме о кинетической энергии, работа задерживающего электрического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектронов. Значит, зная величину задерживающего напряжения можно найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$A_з = \Delta E_k \Rightarrow e \cdot U_з = \frac{m \cdot v_{макс}^2}{2}, \quad (14.16)$$

Экспериментальные исследования, выполненные Столетовым, привели к установлению основных **законов внешнего фотоэффекта**:

**1-й закон:** Сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна световому потоку:

$$I_n = k \cdot \Phi, \quad (14.17)$$

где  $k$  – **фоточувствительность** вещества и выражается в микроамперах на люмен (мкА /лм).

**2-й закон:** скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

**3-й закон:** для каждого вещества существует красная граница внешнего фотоэффекта, то есть минимальная частота света  $\nu_{min}$ , при которой еще возможен фотоэффект.

Объяснение явления фотоэффекта было дано А. Эйнштейном в 1905 году на основе гипотезы о том, что свет представляет собой не волну, а поток частиц – световых квантов или фотонов. Он предложил уравнение, ко-

торое является частным случаем закона сохранения и превращения энергии применительно к фотоэффекту.

Согласно **уравнению Эйнштейна**, энергия фотона расходуется электроном на совершение работы по выходу из вещества и сообщение электрону кинетической энергии:

$$h \cdot \nu = A_{\text{вых.}} + \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (14.18)$$

где  $h=6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка;

$\nu$  – частота;

$A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из вещества;

$\frac{m \cdot v^2}{2}$  – кинетическая энергия выбитых электронов;

$m$  – масса электрона;

$v$  – скорость электрона.

**Работа выхода электрона  $A_{\text{вых}}$**  – это работа, которую нужно совершить, чтобы вырвать электрон из вещества на поверхность.

Величина работы выхода зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Внешний фотоэффект является результатом взаимодействия фотонов с находящимися у поверхности металла электронами. При столкновении с одним из таких электронов фотон полностью передает ему свою энергию и, если она достаточно велика, электрон сможет преодолеть силы, удерживающие его в металле, и вылететь наружу. Каждый электрон выбивается из металла одним фотоном, поэтому его скорость определяется лишь энергией фотона, т.е. частотой падающего света (2-й закон фотоэффекта). Повышение интенсивности света приводит к увеличению плотности фотонов. Следовательно, увеличивается число соударений в единицу времени фотонов с электронами. Это объясняет прямую зависимость между интенсивностью падающего света и силой фототока (1-й закон фотоэффекта).

Третий закон фотоэффекта объясняется следующим образом. Так как **красная граница фотоэффекта определяется минимальной частотой  $\nu_{\text{min}}$  падающего света, при которой начинается фотоэффект**, то  $E=h \cdot \nu_{\text{min}}$  – минимальная энергия фотона, передаваемая электрону и идущая на совершение работы выхода  $A_{\text{вых}}$  электрона из вещества.

Тогда  $A_{\text{вых}} = h \cdot \nu_{\text{min}}$  и красную границу фотоэффекта можно определить по формуле:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых.}}}{h} \quad (14.19)$$

Явление фотоэффекта нашло широкое практическое применение. На основе фотоэффекта разрабатываются и выпускаются многочисленные промышленные устройства. Среди них можно выделить фотоэлементы,

используемые для регистрации световых потоков и применяемые в различных областях техники: связи, автоматике, телемеханике и т. д.

**Фотоэлементами** называют приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии излучения в электрическую энергию.

Поглощение света биологическими системами может сопровождаться специфическими фотохимическими реакциями, которые дают начало различным фотобиологическим процессам. Фотохимические процессы являются ключевыми в жизнедеятельности биосистем.

**Фотохимическими реакциями** называют такие химические реакции, которые протекают только под воздействием света.

**Основной закон фотохимических реакций** утверждает, что количество прореагировавшего вещества пропорционально количеству поглощенной им световой энергии.

Любая фотохимическая реакция начинается поглощением фотона, в результате чего молекула переходит в возбужденное состояние. Энергия фотонного излучения намного превышает энергию теплового излучения при обычных температурах. Высокая энергия вызывает повышение химической активности молекул, что дает им возможность вступать в химические реакции, которые в обычных условиях неосуществимы.

Примерами фотохимических реакций могут служить:

#### *1. Фотораспад*

После поглощения кванта света происходит разрыв химических связей и расщепление молекулы на радикалы, ионы или нейтральные более простые молекулы. Пример: распад аминокислот, белков после облучения большими дозами ультрафиолета.

#### *2. Фотоприсоединение*

Заключается в присоединении к возбужденной молекуле других молекул. Когда под действием света соединяются две одинаковые молекулы – это фотодимеризация, когда к возбужденной молекуле присоединяется молекула кислорода – это фотоокисдирование, (а если молекула воды – фотогидратация).

#### *3. Фотоизомеризация*

Происходит внутримолекулярная перегруппировка связей (изомеризация), происходящая под действием света.

**Фотобиологические процессы** – это процессы, которые начинаются с поглощения квантов света биологически функциональными молекулами и заканчиваются соответствующей физиологической реакцией организма или ткани.

Все разнообразие фотобиологических процессов можно свести к реализации нескольких последовательных стадий:

- возбуждение молекулы при поглощении кванта света;
- первичные фотохимические реакции с образованием продуктов, способных участвовать в химических реакциях без участия света;
- вторичные химические реакции;
- физиологический отклик ткани или организма.

К фотобиологическим процессам относятся:

- *фотосинтез* (синтез органических молекул за счет энергии солнечного света);
- *фототропизм* (поворот листьев (стеблей) растений к свету или от него);
- *фотопериодизм* (регуляция суточных и годовых циклов животных путем циклических воздействий «свет - темнота»);
- *фототаксис* (движение организмов (например, бактерий) к свету или от света);
- *зрение* (восприятие света глазом, сопровождающееся превращением световой энергии в энергию нервного импульса);
- изменения состояния кожи под воздействием света: эритема, эдема, загар, пигментация, ожог, рак кожи.

Самым важным процессом на Земле, происходящим под действием света, является *фотосинтез*.

***Фотосинтез*** - это фотохимическая реакция синтеза органических веществ из углерода неорганических соединений и воды с образованием свободного молекулярного кислорода.

Эта реакция протекает в растениях и бактериях с участием хлорофиллов и некоторых других пигментов, которые играют роль катализаторов:



Фотосинтез является единственным процессом, посредством которого органический мир пополняет свои запасы свободной энергии за счет энергии солнечного излучения, в то время как в процессах жизнедеятельности эта свободная энергия непрерывно растрачивается.

Постоянно создавая органические вещества, освобождая атмосферу от углекислого газа и наполняя ее кислородом, *фотосинтез обеспечивает условия, необходимые для существования жизни на Земле.*

## V. АТОМНАЯ ФИЗИКА

*Атомная физика* – раздел физики, изучающий строение и свойства атомов, а также элементарные процессы, происходящие на атомном уровне.

Теоретической базой атомной физики является *квантовая механика*, которая изучает законы движения микрочастиц и их систем.

### Тема №15. Строение атома. Рентгеновское излучение. Люминесценция

#### 15.1. Строение атома. Постулаты Бора. Квантование радиуса орбиты и энергии электрона в атоме

*Атом* (от греческого *atomos* – неделимый) – это наименьшая частица химического элемента, сохраняющая все его химические свойства.

К началу XX в. было установлено, что в состав каждого атома входят электроны. Вместе с тем было известно, что атом в целом электрически нейтрален. Отсюда следовало, что отрицательный заряд электронов должен компенсироваться положительным зарядом других частиц, также входящих в состав атома.

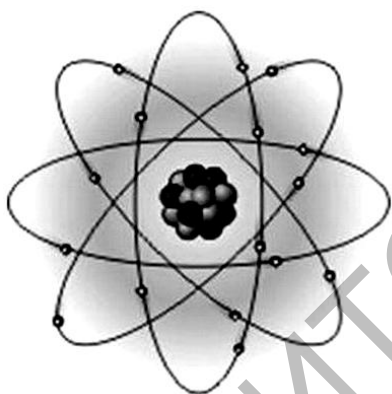


Рисунок 15.1

В 1911 году английский физик Э. Резерфорд предложил планетарную модель строения атома (рисунок 15.1). Согласно этой модели, весь положительный заряд и почти вся масса (более 99,9%) атома сосредоточены в атомном ядре, размер которого  $\approx 10^{-15}$  м, в то время как размер атома  $\approx 10^{-10}$  м. Вокруг ядра по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Заряд ядра равен по абсолютному значению суммарному заряду электронов:

$$q = Z\bar{e}, \quad (15.1)$$

где  $Z$  - порядковый номер элемента в периодической таблице Менделеева,  $\bar{e} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – абсолютное значение заряда электрона.

Однако планетарная модель строения атома Резерфорда не укладывалась в рамки законов классической физики.

Во-первых: согласно законам классической электродинамики, электрон, вращаясь вокруг ядра (т.е. двигаясь с ускорением), должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Но уменьшение энергии приводит к уменьшению радиуса орбиты электрона. Следовательно, электрон должен двигаться по спирали, приближаясь к ядру, и за короткий промежуток времени упасть на ядро.

Во-вторых, по мере приближения электрона к ядру частота вращения электрона, а следовательно, частота электромагнитного излучения, должны

непрерывно увеличиваться. Это значит, что атом должен давать сплошной спектр излучения.

Однако в действительности атомы являются весьма устойчивыми системами и имеют линейчатые, а не сплошные спектры излучения.

Пытаясь разрешить это противоречие, в 1913 г. датский физик Н. Бор предложил новую теорию, в основу которой были положены представления о квантовой природе света. Новым в этой теории была идея о том, что процессы, происходящие внутри атома при излучении, подчиняются квантовым закономерностям.

Таким образом, исходя из представления о дискретности энергетических состояний, Н. Бор создал квантовую теорию строения атома. В ее основу были положены постулаты Бора.

### **Первый постулат Бора:**

*Электроны в атоме могут двигаться по орбитам строго определенного радиуса, которые называются **стационарными**. Находясь на стационарных орбитах, электроны не излучают и не поглощают энергию.*

На этих орбитах момент импульса электрона определяется по формуле:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (15.2)$$

где  $m$  – масса электрона;

$v$  – его скорость;

$r$  – радиус  $n$ -ой стационарной орбиты;

$mvr$  – момент импульса электрона;

$n$  – номер орбиты или главное квантовое число;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

Формула (15.2) представляет собой **условие квантования орбит**.

### **Второй постулат Бора:**

*При переходе из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает энергию электромагнитного излучения определенными порциями – **квантами**, или **фотонами**:*

$$h\nu = W_m - W_n \quad (15.3)$$

Выражение (15.3) называют **условием квантования частот**.

*Энергия излученного или поглощенного кванта равна разности энергий стационарных состояний электрона до перехода  $W_m$  и после перехода  $W_n$ .*

Таким образом, частота излучаемых или поглощаемых атомом электромагнитных волн определяется не частотой вращения электронов, а разностью энергии стационарных состояний атома.

**Радиус стационарной орбиты атома** определяется по формуле:



$$r_n = \frac{k \cdot n^2}{Z}, \quad (15.4)$$

где  $k = 0,529 \cdot 10^{-10}$  м – радиус первой стационарной орбиты;  
 $Z$  – порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева;  
 $n$  – номер орбиты.

Радиусы последующих орбит возрастают пропорционально  $n^2$ .

**Полная энергия электрона в атоме** состоит из кинетической энергии движения на орбите и потенциальной энергии кулоновской силы притяжения к ядру и определяется по формуле:

$$W = W_{кин} + W_{пот} = \frac{M \cdot Z^2}{n^2}, \quad (15.5)$$

где  $M = -13,55$  эВ – энергия первой стационарной орбиты.

Таким образом, полная энергия электрона принимает только некоторые разрешенные значения, зависящие от целого числа  $n$ . С ростом числа  $n$  энергия увеличивается. На большом расстоянии от ядра при  $r \rightarrow \infty$  энергия становится равной 0 и электрон может покинуть атом. Этот процесс называется **ионизацией** атома. В стабильных атомах электроны находятся в энергетических состояниях, соответствующих минимальной энергии. Если атому сообщить энергию, то электрон переходит на более удаленную орбиту от ядра. Такое состояние атома называется **возбужденным**.

**Атомными спектрами** называются спектры излучения или испускания электромагнитных волн одиночными атомами. Атомные спектры обусловлены электронными переходами между стационарными орбитами и являются линейчатыми.

Согласно второму постулату Бора, при переходе электрона с  $m$ -й орбиты на  $n$ -ю орбиту излучается или поглощается квант энергии с частотой:

$$\nu = \frac{W_m - W_n}{h}, \quad (15.6)$$

Подставив в эту формулу выражение для полной энергии электрона на  $m$  и  $n$  уровнях, получаем:

$$\nu = \frac{M \cdot Z^2}{h} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = RZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (15.7)$$

где  $R = 3,29 \cdot 10^{15}$  с<sup>-1</sup> – постоянная Ридберга;  
 $Z$  – порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева;  
 $n$  – номер орбиты, на которую переходит электрон;  
 $m$  – номер орбиты, с которой переходит электрон.

При излучении кванта  $n < m$ , а при поглощении  $n > m$ .

Выражение (15.7) носит название **формула Ридберга**. Данная формула позволяет определить частоты  $\nu$ , соответствующие различным энергетическим переходам в водородоподобных атомах.

Совокупность спектральных линий, соответствующих переходам с любых верхних энергетических уровней на один и тот же энергетический уровень, образует спектральную серию в излучении.

Рассмотрим серии в спектре излучения атома водорода  $Z=1$  (рисунок 15.2).

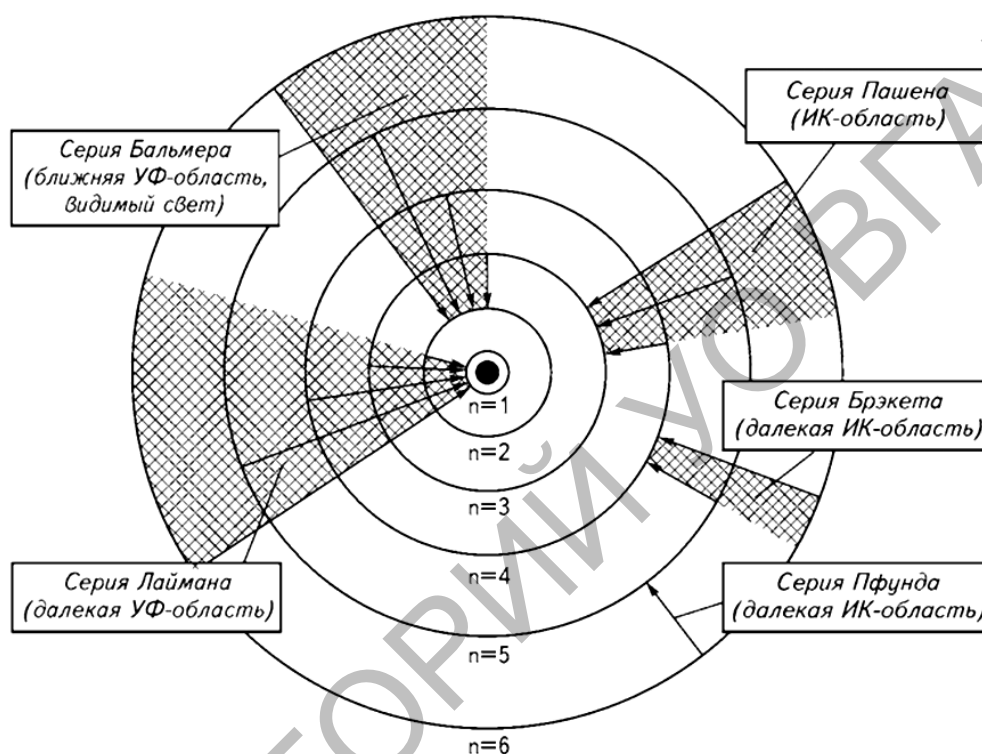


Рисунок 15.2

1. Если электрон в возбужденном атоме переходит на первую стационарную орбиту ( $n=1$ ) со второй, третьей, четвертой и т.д. орбит, то происходит излучение в ультрафиолетовой области спектра. Эта серия называется **серией Лаймана**:

$$\nu = R \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{m^2} \right), \quad \text{где } m=2,3,4,\dots \quad (15.8)$$

2. **Серия Бальмера** дает излучение в видимой области спектра и образуется при переходе электрона с 3-й, 4-й, 5-й, 6-й, и т.д. орбит на вторую стационарную орбиту ( $n=2$ )

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad \text{где } n=2, \text{ а } m=3,4,5, \dots \quad (15.9)$$

3). *Серия Пашена* соответствует *инфракрасной области спектра*. Это излучение происходит при переходе электрона с 4-й, 5-й, 6-й, и т. д. орбит на третью стационарную орбиту:

$$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right), \text{ где } n=3, \text{ а } m = 4, 5, 6, \dots, \quad (15.10)$$

Таким образом, можно объяснить наличие линейчатых спектров, образующихся у атома водорода при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.

В основе современной теории строения атома электрон в атоме не движется по определенным траекториям (орбитам), а может находиться в любой части пространства вблизи ядра (электрон как бы «размазан» вблизи ядра, в чем проявляется его волновая природа). Пространство вблизи ядра, в котором вероятность нахождения электрона достаточно велика, называют орбиталью или электронным облаком.

Состояние электрона в атоме однозначно определяется квантовыми числами:  $n$  – главное,  $l$  – орбитальное и  $s$  – спиновое. Форма и размеры облаков зависят от  $n$  и  $l$ . Главное квантовое число определяет энергетические уровни электрона в атоме. Орбитальное характеризует орбитальный момент импульса электрона и, соответствующий ему магнитный момент. Спиновое число характеризует собственный момент импульса электрона и соответствующий ему магнитный момент.

Энергия электрона в атоме может принимать только строго определенные значения (энергетические уровни). При переходе электрона с более высокого на более низкий энергетический уровень излучается квант энергии, а поглощение кванта энергии происходит при обратном переходе. Если главное квантовое число ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) определяет энергетические уровни электрона в атоме, то орбитальное ( $l = 0, 1, 2, 3 \dots$ ) и спиновое ( $s = 1/2$ ) квантовые числа определяют дополнительные энергетические уровни электронов: при определенных условиях энергетический уровень с номером  $n$  может расщепиться на несколько дополнительных.

## **15.2. Рентгеновское излучение и его виды. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом**

*Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны от 80 нм до  $10^{-5}$  нм.*

На шкале электромагнитных волн рентгеновское излучение занимает область между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением.

Рентгеновское излучение невидимо для глаза, обладает большой интенсивностью и проникающей способностью.

Естественными источниками рентгеновского излучения являются некоторые радиоактивные изотопы, например  $^{55}\text{Fe}$ . Искусственными источ-

никами мощного рентгеновского излучения являются *рентгеновские трубки*.

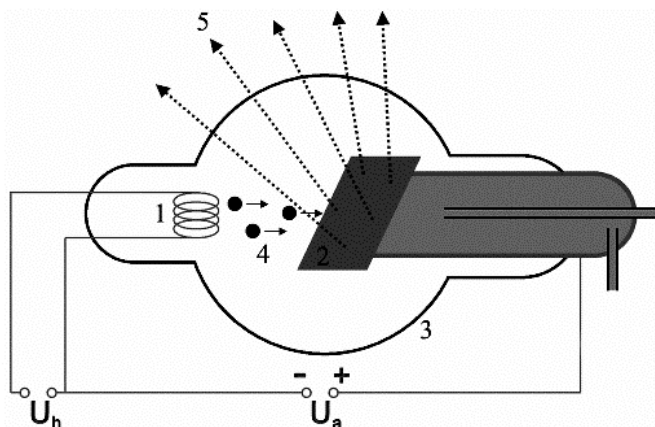


Рисунок 15.3

Рентгеновская трубка представляет собой стеклянную вакуумную колбу (3) с двумя электродами (рисунок 15.3): катодом  $K$  (1) и анодом  $A$  (2). Нагретый катод является источником электронов. Анод представляет металлический стержень, на скошенном торце которого имеется пластинка из металла с высоким порядковым номером.

Между катодом и анодом прикладывают высокое напряжение (10 кВ – 40 кВ). Электроны (4), ускоренные электрическим полем между катодом и анодом, разгоняются до больших скоростей и попадают на анод.

При взаимодействии этих электронов с веществом анода возникает два вида рентгеновского излучения: *тормозное* и *характеристическое*.

Согласно законам электродинамики, при ускорении или торможении любого движущегося заряда возникает электромагнитное излучение. Причем частота этого излучения тем больше, чем больше модуль ускорения. Если заряженная частица, обладающая большой кинетической энергией, испытывает резкое торможение, то возникает рентгеновское излучение.

*Излучение, возникающее при торможении электрона в веществе анода, называют тормозным рентгеновским излучением.*

Поток электронов, падающих на анод, порождает рентгеновские кванты разных энергий, поэтому спектр тормозного рентгеновского излучения оказывается *сплошным*. В этом спектре существует коротковолновая граница, определяющая минимальную длину волны  $\lambda_{min}$  (наибольшую возможную частоту  $\nu_{max}$ ) рентгеновского излучения при заданном напряжении  $U$  на трубке. Наибольшая частота  $\nu_{max}$  наблюдается в случае, когда вся кинетическая энергия электронов переходит в излучение.

По закону сохранения энергии  $h\nu_{max} = \bar{e}U$

Так как  $\nu_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}$ , то  $h \frac{c}{\lambda_{min}} = \bar{e}U$

Отсюда получим формулу коротковолновой границы рентгеновского спектра торможения:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{\bar{e}U}, \quad (15.11)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\bar{e} = |-1,6 \cdot 10^{-19}| Кл$  – заряд электрона;  
 $c$  – скорость света в вакууме;  $U$  – напряжение между катодом и анодом.

Из формулы (15.11) видно, что с повышением напряжения между анодом и катодом уменьшается значение  $\lambda_{min}$  и излучение становится более жестким (рентгеновские лучи коротких длин волн называют жестким, а длинноволновые – мягким). Поэтому регулировка жесткости в рентгеновских аппаратах осуществляется изменением напряжения между анодом и катодом.

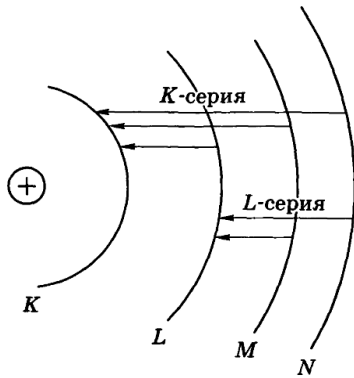


Рисунок 15.4

При взаимодействии катодных электронов с атомами анода наряду с тормозным рентгеновским излучением возникает рентгеновское излучение, спектр которого состоит из отдельных линий. Это излучение имеет следующее происхождение (рисунок 15.4). Некоторые катодные электроны проникают вглубь атома и выбивают электроны с его внутренних оболочек. Образовавшиеся при этом вакантные места заполняются электронами с верхних оболочек, в результате чего высвечиваются кванты излучения.

Это излучение содержит дискретный набор частот, определяемый материалом анода, и называется **характеристическим излучением**.

**Характеристическое рентгеновское излучение** – электромагнитное излучение, испускаемое при переходах электронов с внешних электронных оболочек атома на внутренние.

**Характеристический спектр** – линейчатый рентгеновский спектр, возникающий при переходах электронов с верхних оболочек атома на более близко расположенные к ядру K, L, M, N – оболочки.

Частоты, соответствующие линиям характеристического излучения, определяются по **формуле Мозли**:

$$\sqrt{\nu} = aZ - b, \quad (15.12)$$

где Z- атомный номер вещества, a,b - некоторые константы.

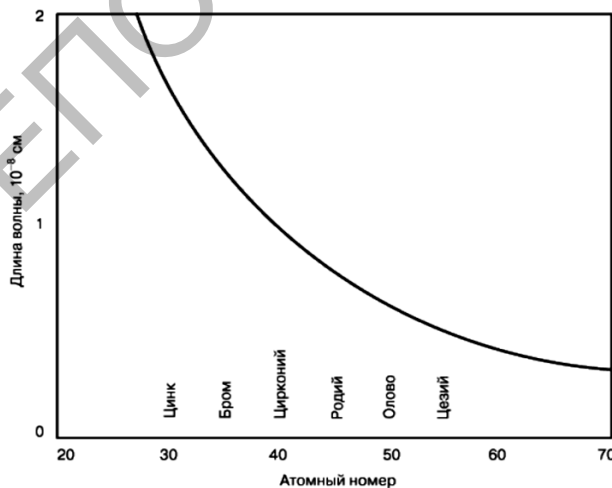


Рисунок 15.5

Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химически элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая на рисунке 15.5 соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

При падении рентгеновского излучения на вещество оно частично отражается, а основная его часть проходит вглубь, где излучение частично поглощается и рассеивается, а частично проходит насквозь.

При взаимодействии рентгеновского излучения с веществом могут возникать следующие явления:

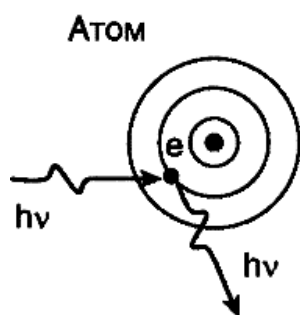


Рисунок 15.6

**1. Когерентное (упругое) рассеяние** происходит тогда, когда энергия рентгеновского фотона недостаточна для внутренней ионизации атома (выбивания электрона с одной из внутренних оболочек):  $h\nu < A_{\text{выл}}$ . При этом изменяется направление движения фотона, а его энергия и длина волны не изменяются (поэтому это рассеяние и называется упругим). Оно характерно для длинноволнового (мягкого) излучения (рисунок 15.6).

**2.** Если  $h\nu \approx A_{\text{выл}}$ , то возможны два варианта:

а)  $h\nu \leq A_{\text{выл}}$ . В этом случае происходит возбуждение атома с последующим излучением фотонов в области видимого излучения – **рентгенолюминесценция**, а в тканях организма – к активации молекул и **фотохимическим реакциям**.

б) если  $h\nu \geq A_{\text{выл}}$ , то наблюдается **фотоэффект** (рисунок 15.7).

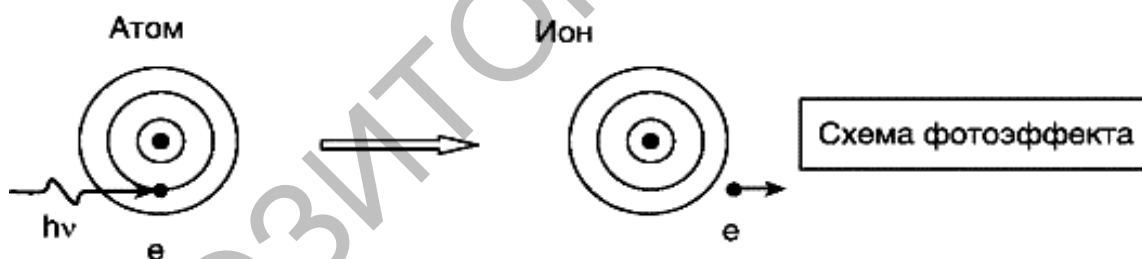


Рисунок 15.7

В этом случае энергия фотона  $h\nu$  достаточна для ионизации атома. При этом рентгеновский квант поглощается, а его энергия расходуется на ионизацию и сообщение кинетической энергии выбитому электрону:

$$h\nu = A_{\text{выл}} + E_{\text{к}}$$

**3. Комpton-эффект** происходит в случае, если энергия фотона во много раз превышает  $A_{\text{выл}}$  электрона, т.е.  $h\nu \gg A_{\text{выл}}$ . В этом случае электрон отрывается от атома и наблюдается вторичное излучение с частотой  $\nu'$  меньшей, чем частота первичного излучения (рисунок 15.8).

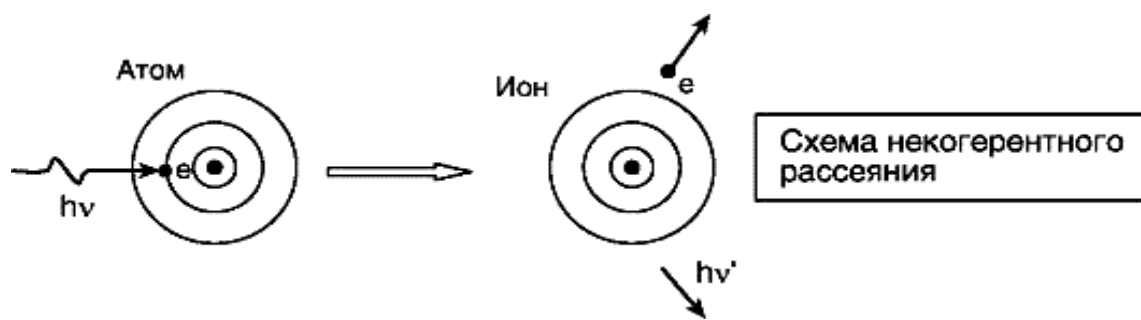


Рисунок 15.8

Вторичное излучение рассеивается по всевозможным направлениям:

$$h\nu = A_{\text{выл}} + \frac{mv^2}{2} + h\nu' \quad (15.13)$$

Таким образом, жесткие рентгеновские лучи за счет фотоэффекта, эффекта Комптона, а также вторичных процессов вызывают значительную ионизацию вещества. Подобная ионизация ведет к образованию свободных радикалов, что отрицательно влияет на кинетику биохимических процессов в тканях.

При прохождении излучения через вещество его интенсивность уменьшается. Часть рентгеновского излучения, проходя через вещество, поглощается, а часть рассеивается.

Уменьшение интенсивности рентгеновских лучей при прохождении через вещество происходит по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (15.14)$$

где  $I$  – интенсивность излучения, достигшего слоя на глубине  $d$ ;

$I_0$  – интенсивность излучения, падающего на поверхность вещества;

$d$  – толщина слоя;

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления, зависящий от плотности вещества, длины волны и атомного номера.

Существенное различие поглощения рентгеновского излучения разными тканями позволяет использовать его в рентгенодиагностике.

В медицинской практике используют следующие методы рентгенодиагностики:

- *рентгеноскопия* - изображения внутренних органов рассматривают на рентгенолюминесцирующем экране;
- *флюорография* - изображение, полученное на экране, фотографируется на чувствительную малоформатную пленку;
- *рентгенография* – изображение фиксируется на пленке;

- *ангиография* - исследование кровеносных сосудов. Через катетер в вену вводится контрастное вещество, после чего мощный рентгеновский аппарат выполняет серию снимков, следующих друг за другом через доли секунды;

- *рентгеновская компьютерная томография*. Этот вид рентгеновского обследования позволяет получить изображение плоского сечения тела толщиной несколько мм. При этом заданное сечение многократно просвечивается под разными углами с фиксацией каждого отдельного изображения в памяти компьютера.

Рентгеновское излучение используют также для лечебных целей – *рентгенотерапия*. В медицине используют рентгеновское излучение с длиной волны от 10 нм до 0,005 нм.

Биологическое действие излучения заключается в нарушении жизнедеятельности клеток. В связи с этим рентгенотерапия применяется для борьбы со злокачественными новообразованиями.

### 15.3. Люминесценция и ее виды. Фотолюминесценция. Правило Стокса

Атомы, молекулы, ионы представляют собой квантовые системы, в которых электроны находятся на разных энергетических уровнях. Основное энергетическое состояние атома – это состояние, при котором электроны расположены вокруг ядра в соответствии с принципом минимума энергии. В таком состоянии атомы могут находиться длительное время, поэтому в веществе большинство атомов находится именно в основном состоянии.

Однако возможен скачкообразный переход с одного уровня на другой и атом переходит в возбужденное состояние. Для такого перехода атому необходимо сообщить энергию, равную разности энергий электронов на двух уровнях:  $E = E_2 - E_1$ . Время пребывания в возбужденном состоянии очень короткое  $\sim 10^{-8}$  с. Переход атомов из возбужденного состояния в основное сопровождается излучением фотона энергии (в идеальном случае  $h\nu = E_2 - E_1$ ).

Переход атома из возбужденного состояния может носить самопроизвольный (спонтанный) и индуцированный характер. Излучение, которое при этом возникает, соответственно называется *спонтанным* и *индуцированным*. При самопроизвольном переходе атома из возбужденного состояния в основное процесс носит случайный характер, т.е. случайны и время перехода, и направление излучения фотона. Примером спонтанного излучения может служить *люминесценция*.

Люминесценцией называют свечение тел, которое не может быть объяснено их тепловым излучением. Так, например, в видимой области спектра тепловое излучение становится заметным только при температуре  $\sim 10^3$ - $10^4$  К, а люминесцировать тело может при любой температуре. Поэтому люминесценцию часто называют *холодным свечением*. Одной из



причин, вызывающих люминесценцию, является внешнее излучение, которое возбуждает молекулы тела, например, падающий свет. После прекращения процесса облучения люминесцентное свечение не прекращается тотчас же, а продолжается еще некоторое время.

**Люминесценция** - излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний.

Вещества, способные превращать поглощаемую ими энергию в люминесцентное свечение, называют **люминофорами**.

По виду возбуждения различают следующие типы люминесценции:

- **фотолюминесценция** - возникает при возбуждении атомов светом (ультрафиолетовые лучи и коротковолновая часть видимого света);
- **рентгенолюминесценция** - возникает при возбуждении атомов рентгеновским и гамма-излучением (экраны рентгеновских аппаратов, индикаторы радиации);
- **катодолюминесценция** - возникает при возбуждении атомов электронами (кинескопы, экраны осциллографов, мониторов);
- **радиолюминесценция** - возникает при возбуждении атомов продуктами радиоактивного распада;
- **электролюминесценция** - возникает при возбуждении атомов под действием электрического поля (возбуждение молекул газа электрическим разрядом - газоразрядные лампы);
- **хемилюминесценция** - возникает при возбуждении молекул в процессе химических реакций;
- **биолюминесценция** - возникает в биологических объектах в результате определенных биохимических реакций;
- **сонолюминесценция** - возникает под действием ультразвука.

После устранения возбудителя люминесценция продолжается в течение некоторого промежутка времени. По длительности остаточного свечения различают **флуоресценцию** и **фосфоресценцию**:

- **флуоресценция** - кратковременное остаточное свечение;
- **фосфоресценция** - продолжительное остаточное свечение, длительность которого составляет  $10^{-4}$  -  $10^4$  с.

По внутриатомным процессам различают **спонтанную** и **вынужденную** люминесценцию.

При **спонтанной** люминесценции излучение происходит непосредственно вслед за возбуждением.

У определенных веществ имеются энергетические уровни, называемые метастабильными, на которых возбужденные электроны могут задерживаться достаточно долго.

Переход с метастабильного на основной уровень может быть ускорен путем какого-либо внешнего воздействия на атомы. Вызванное при этом излучение называется **вынужденным**.

При люминесценции происходит преобразование механической, электрической и химической энергии в энергию видимого излучения.

Количественно степень преобразования поглощенной энергии в энергию люминесцентного свечения характеризуется *энергетическим выходом люминесценции*:

$$\eta = \frac{W}{W_0} \quad (15.15)$$

где  $W_0$  - энергия поглощенная,  
 $W$  - энергия вторичного излучения.

Поглощающая способность вещества характеризуется спектром поглощения.

Каждый люминофор характеризуется своими, только ему присущими спектрами люминесценции и поглощения.

На люминесцентное излучение тратится только часть энергии поглощаемого света.

Поэтому для люминесценции выполняется **правило Стокса**: при люминесценции спектр излучения и его максимум сдвинуты по отношению к спектру поглощения и его максимуму в сторону более длинных волн.

Это объясняется тем, что люминесценция – квантовый процесс. Энергия поглощаемого кванта  $h\nu_0$  частично переходит в другие виды энергии, например в теплоту. Следовательно, энергия кванта люминесценции меньше, чем энергия поглощенного кванта  $h\nu$ .

Так как  $h\nu_0 > h\nu$ , то  $\nu_0 > \nu$ , а отсюда следует, что  $\lambda_0 < \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излученного кванта,  $\lambda_0$  - длина волны поглощенного кванта.

Фотолюминесценция наблюдается у многих жидких и твердых тел как органической, так и неорганической природы, особенно под действием ультрафиолетового излучения.

В связи с этим люминесценция широко применяется в медицине, ветеринарии, фармакологии.

Важным применением люминесценции является **люминесцентный анализ**.

*Люминесцентный анализ* - совокупность методов для определения природы и состава вещества по спектру его люминесценции.

- Качественный анализ - определение наличия (или отсутствия) каких-либо веществ (молекул) по форме спектра люминесценции. При этом можно изучать структуру молекул вещества; межмолекулярное взаимодействие; химические превращения.

- Количественный анализ - определение количества вещества по интенсивности спектра люминесценции (можно обнаружить массу вещества  $m = 10^{-13}$  кг).

Если люминофором является растворенное вещество, то при невысокой оптической плотности раствора интенсивность люминесценции пропорциональна концентрации раствора. Поэтому по интенсивности люминесценции можно судить о концентрации раствора.

Люминесцентный анализ используется:

- для проверки качества и сортировки пищевых продуктов;
- при сортировке фармакологических средств;
- в дерматологии (наблюдения свечения волос, чешуек, ногтей при диагностике их поражения грибком и лишаем);
- исследование люминесцирующих микрообъектов при помощи специальных люминесцентных микроскопов и т.д.

В некоторых медицинских исследованиях применяются специальные люминофоры, вводимые в организм и распределяющиеся по тканям в соответствии со своими свойствами. Такие люминофоры получили название *флуоресцентных зондов*. Например, при введении раствора такого люминофора в кровь он разносится по всему организму и диффундирует в дерму и эпидермис. Люминесценция возбуждается длинноволновым ультрафиолетовым излучением и наблюдается в видимом свете. В поверхностных тканях с пониженным кровоснабжением люминесценция появляется позже, чем в тканях с нормальным кровоснабжением.

Примером индуцированного излучения может служить *лазерное излучение*.

Если на атом, находящийся в возбужденном состоянии, подействовать фотоном энергии, то он поглотится атомом уже не сможет (нет уровней, на которые может перейти электрон). В таком случае энергия внешнего фотона приводит к вынужденному переходу электрона на нижний энергетический уровень, который для данного электрона будет основным. При таком переходе образуется 2 фотона. При этом фотон, который появился вследствие индуцированного перехода, является точной копией фотона, инициировавшего переход атома из возбужденного состояния в основное. Он имеет ту же энергию и то же направление, что и вторичный фотон.

Учитывая, что в веществе много атомов, с помощью специальных приемов можно получить лавину одинаковых вторичных фотонов и этим процессом можно управлять.

*Лазер* – прибор для получения мощного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне длин волн путем индуцированных переходов.

Лазерное излучение по своим свойствам значительно отличается от излучения обычных источников света. Отметим его характерные особенности: когерентность, монохроматичность, высокая мощность, узкая направленность пучка, поляризованность.

Лазерное излучение нашло широкое применение в медицине. Выделяют следующие направления:

1. *Лазерная диагностика*. Например, голография (с помощью лазерного излучения получают 3-мерное изображение внутренних полостей желудка, глаза), лазерный анализ крови и т.д.

2. Использование лазерного излучения *в терапии*. Используются низкоинтенсивные лазеры, т.к. низкоинтенсивное излучение не вызывает заметного деструктивного действия на ткани непосредственно во время облучения. Терапия с помощью красного света (используется с противо-

воспалительной целью для лечения ран, язв, ишемической болезни сердца), с помощью синего света (используется, например, для лечения желтухи новорожденных), фотодинамическая терапия опухолей (используется для удаления опухолей, доступных для облучения светом).

3. Использование лазерного излучения *в хирургии*. В хирургии высокоинтенсивные лазеры используются для рассечения тканей, удаления патологических участков, остановки кровотечения, сваривания тканей. Выбирая должным образом длину волны излучения, его интенсивность и длительность воздействия, можно получать различные хирургические эффекты.

РЕПОЗИТОРИЙ УО ВГАВМ

## Литература

1. Белановский, А. С. Основы биофизики в ветеринарии / А. С. Белановский. – Москва : Дрофа, 2007. – 332 с.
2. Березовский, В. А. Биофизические характеристики тканей человека / В. А. Березовский, Н. Н. Колотилов – Киев : Наукова думка, 1990. – 185 с.
3. Ветеринарная энциклопедия : в 2 т. / С. С. Абрамов [и др.] ; ред. А. И. Ятусевич. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2013. – Т. 1 : А – К. – 463 с.
4. Ветеринарная энциклопедия: в 2 т. / С. С. Абрамов [и др.] ; ред. А. И. Ятусевич. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2013. – Т. 2 : К–Я. – 597 с.
5. Грабовский, Р. И. Курс физики / Р. И. Грабовский. – Москва : Высшая школа, 2004. – 605 с.
6. Костин, А. П. Физиология сельскохозяйственных животных / А. П. Костин, Ф. А. Мещеряков, А.А. Сысоев. – Москва : Колос, 1974. – 480 с.
7. Ливенцев, Н. М. Курс физики для медвузов / Н. М. Ливенцев. – Москва : Высшая школа, 1999. – 648 с.
8. Лещенко, В. Г. Медицинская и биологическая физика / В. Г. Лещенко, Г. К. Ильич. – Минск : Новое знание, Москва : ИНФРА-М, 2012. – 552 с.
9. Ремизов, А. Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медвузов / А. Н. Ремизов. – Москва : Высшая школа, 1982. – 607 с.
10. Соболевский, В. И. Физика и биофизика / В. И. Соболевский, Л. П. Даниленко, А. Н. Толкач. – Витебск : ВГАВМ, 2012. – 112 с.
11. Соболевский, В. И. Физика и биофизика / В. И. Соболевский, Л. П. Даниленко, О. В. Пышненко. – Витебск : ВГАВМ, 2008. – 131 с.
12. Соболевский, В. И. Механизм электрогенеза в клетках / В. И. Соболевский. – Витебск : УО ВГАВМ, 2003. – 30 с.
13. Тиманюк, В. А. Биофизика / В. А. Тиманюк. – Харьков : Изд-во НФАУ; Золотые страницы, 2003. – 704 с.



## УО «ВИТЕБСКАЯ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА» ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ВЕТЕРИНАРНОЙ МЕДИЦИНЫ»

Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины является старейшим учебным заведением в Республике Беларусь, ведущим подготовку врачей ветеринарной медицины, ветеринарно-санитарных врачей, провизоров ветеринарной медицины и зооинженеров.

Вуз представляет собой академический городок, расположенный в центре города на 17 гектарах земли, включающий в себя единый архитектурный комплекс учебных корпусов, клиник, научных лабораторий, библиотеки, студенческих общежитий, спортивного комплекса, Дома культуры, столовой и кафе, профилактория для оздоровления студентов. В составе академии 4 факультета: ветеринарной медицины; биотехнологический; повышения квалификации и переподготовки кадров агропромышленного комплекса; довузовской подготовки, профориентации и маркетинга. В ее структуру также входят Аграрный колледж УО ВГАВМ (п. Лужесно, Витебский район), филиалы в г. Речице Гомельской области и в г. Пинске Брестской области, первый в системе аграрного образования НИИ прикладной ветеринарной медицины и биотехнологии (НИИ ПВМ и Б).

В настоящее время в академии обучается более 4 тысяч студентов, как из Республики Беларусь, так и из стран ближнего и дальнего зарубежья. Учебный процесс обеспечивают около 330 преподавателей. Среди них 170 кандидатов, 27 докторов наук, 135 доцентов и 22 профессора.

Помимо того, академия ведет подготовку научно-педагогических кадров высшей квалификации (кандидатов и докторов наук), переподготовку и повышение квалификации руководящих кадров и специалистов агропромышленного комплекса, преподавателей средних специальных сельскохозяйственных учебных заведений.

Научные изыскания и разработки выполняются учеными академии на базе Научно-исследовательского института прикладной ветеринарной медицины и биотехнологии. В его состав входит 2 отдела: научно-исследовательских экспертиз (с лабораторией биотехнологии и лабораторией контроля качества кормов); научно-консультативный.

Располагая современной исследовательской базой, научно-исследовательский институт выполняет широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований, осуществляет анализ всех видов биологического материала и ветеринарных препаратов, кормов и кормовых добавок, что позволяет с помощью самых современных методов выполнять государственные тематики и заказы, а также на более высоком качественном уровне оказывать услуги предприятиям агропромышленного комплекса. Активное выполнение научных исследований позволило получить сертификат об аккредитации академии Национальной академией наук Беларуси и Государственным комитетом по науке и технологиям Республики Беларусь в качестве научной организации. Для проведения данных исследований отдел научно-исследовательских экспертиз аккредитован в Национальной системе аккредитации в соответствии с требованиями стандарта СТБ ИСО/МЭК 17025.

Обладая большим интеллектуальным потенциалом, уникальной учебной и лабораторной базой, вуз готовит специалистов в соответствии с европейскими стандартами, является ведущим высшим учебным заведением в отрасли и имеет сертифицированную систему менеджмента качества, соответствующую требованиям ISO 9001 в национальной системе (СТБ ISO 9001 – 2015).

[www.vsavm.by](http://www.vsavm.by)

210026, Республика Беларусь, г. Витебск, ул. 1-я Доватора, 7/11, факс (0212)51-68-38, тел. 53-80-61 (факультет довузовской подготовки, профориентации и маркетинга); 51-69-47 (НИИ ПВМ и Б); E-mail: [vsavmpriem@mail.ru](mailto:vsavmpriem@mail.ru).

Учебное издание

**Петроченко** Ирина Олеговна,  
**Толкач** Алексей Николаевич,  
**Коваленок** Наталья Павловна и др.

### **ФИЗИКА И БИОФИЗИКА**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск Е. Л. Братушкина  
Технический редактор Е. А. Алисейко  
Компьютерный набор И. О. Петроченко  
Компьютерная верстка Е. А. Алисейко  
Корректоры Т. А. Драбо,  
Е. В. Морозова

Подписано в печать 29.03.2019. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. п. л. 12,96. Уч.-изд. л. 11,37. Тираж 250 экз. Заказ 1900.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета»  
государственная академия ветеринарной медицины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/ 362 от 13.06.2014.

ЛП №: 02330/470 от 01.10.2014 г.

Ул. 1-я Доватора, 7/11, 210026, г. Витебск.

Тел.: (0212) 51-75-71.

E-mail: rio\_vsavm@tut.by

<http://www.vsavm.by>