

Учреждение образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка»

Физический факультет

Кафедра общей физики

УМ 25-91-40-2014
рег. № _____ дата 27.06.2014

СОГЛАСОВАНО
Заведующий кафедрой
Соболь В.Р.
25 04 2014г.

СОГЛАСОВАНО
Декан факультета
Соболь В.Р.
28 06 2014г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ
ДИСЦИПЛИНЕ

ФИЗИКА

для специальностей:

- 1 - 02 04 -01 Биология и химия;
1 - 02 04 -02 Биология и география

Составители:
С.Н. Пастушонок, канд. физ.-мат. наук, доцент
О.М. Михалкович, старший преподаватель

Рассмотрено и утверждено
на заседании Совета БГПУ 26 июня 2014г.

протокол № 9

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	7
Тема 1. Раздел «Элементы механики»	8
Тема 2. Раздел «Элементы молекулярной физики»	10
Тема 3. Раздел «Электродинамика»	12
Тема 4. Раздел «Оптика»	16
Тема 5. Раздел «Элементы квантовой физики»	18
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	20
Лабораторная работа № 1	21
Определение линейных размеров, массы, тока, напряжения. Изучение электроизмерительных приборов	21
Лабораторная работа № 2.....	30
Изучение прямолинейного движения тел в поле силы тяжести на машине Атвуда.....	30
Лабораторная работа № 3	38
Определение скорости движения воздушного потока в трубке Вентури. Измерение кровяного давления.....	38
Лабораторная работа № 4.....	44
Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости	44
Лабораторная работа № 5.....	51
Определение модуля упругости костной ткани	51
Лабораторная работа № 6.....	56
Определение вязкости газов	56
Лабораторная работа № 7.....	61
Определение отношения теплоемкостей газа ($\gamma = C_p / C_v$) методом Клемана – Дезорма	61
Лабораторная работа № 8.....	68
Определение абсолютной и относительной влажности воздуха.....	68
Лабораторная работа № 9.....	75
Определение коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давления	75
Лабораторная работа № 10.....	80
Определение среднего теплового коэффициента линейного расширения тел.....	80
Лабораторная работа № 11	86
Изучение дифракционной решетки	86
Лабораторная работа № 12.....	91
Исследование магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра	91

Лабораторная работа № 13	97
Дозиметрия ионизирующих излучений	97
Лабораторная работа № 14	111
Измерение времени соударения шаров. Статистический метод оценки случайных погрешностей	111
Литература	117
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	118
Вопросы к зачету по курсу «Физика»	118
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	120
Литература	120
Электронные учебные ресурсы	121
Электронное сопровождение лабораторных и самостоятельных работ	121
Перечень наглядных и других пособий, методических материалов к техническим средствам, используемым в учебном процессе	122
Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы	122
Учебно-тематический план дисциплины «Физика» для специальностей 01-02 04 01 Биология и химия, 01-02 04 02 Биология и география	123
Таблицы	129
1. Фундаментальные физические постоянные	129
2. Международная система единиц (СИ)	130
3. Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования	130
Некоторые особенности применения стандарта «Метрология. Единицы физических величин»	131
4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц	133
5. Латинский алфавит	134
6. Греческий алфавит	134

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебно-методический комплекс (УМК) по учебной дисциплине «Физика» предназначен для научно-методического обеспечения профессиональной подготовки студентов факультета естествознания БГПУ, создан в соответствии с требованиями образовательных программ и образовательных стандартов высшего образования (Кодекс Республики Беларусь об образовании, 2010, Положение об учебно-методическом комплексе на уровне высшего образования, 2011).

Содержание учебно-методического комплекса показывает, что он соответствует первой ступени обучения в системе многоуровневого педагогического образования. Комплекс составлен с учетом того, что в специальной подготовке учителя биологии, химии или географии для средней школы курс общей физики не является профильным.

Цель УМК – сформировать у студентов целостную систему знаний о физической картине мира, привить навыки и умения применять эти знания для объяснения различных явлений в природе и технике. Особое внимание уделено разъяснению смысла физических явлений и законов.

Задачи УМК по учебной дисциплине «Физика» определяются совокупностью требований к знаниям и умениям специалиста, сформулированным в образовательном стандарте для специальностей 1-02 04 01 Биология и химия; 1-02 04 02 Биология и география:

- развитие познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей в процессе приобретения знаний и умений по физике с использованием различных источников информации и современных информационных технологий,

- развитие представлений: о физике как части современного естествознания, об идеях и методах физической науки; о границах применимости физических законов и теорий, о роли выдающихся учёных в развитии физики;

- освоение системы знаний о фундаментальных физических законах и принципах, лежащих в основе современной физической картины мира; наиболее важных открытиях в области физики, оказавших определяющее влияние на развитие биологии и химии, географии и техники;

- формирование основ научного мировоззрения, понимания значимости физики для развития техники и общественного прогресса;

- овладение исследовательскими умениями проводить наблюдения, планировать, выполнять и оценивать результаты физических экспериментов, выдвигать гипотезы и строить модели, применять полученные знания по физике для объяснения разнообразных природных явлений и свойств веществ; оценивать достоверность естественно-научной информации; использовать физические знания в практической деятельности;

- овладение умениями применять полученные знания: для обеспечения безопасности жизни, рационального природопользования и охраны окружающей среды.

Структура УМК по дисциплине «Физика»

Раздел УМК и его характеристика	Структурные элементы УМК
Теоретический Содержит материалы для теоретического изучения учебного предмета (дисциплины) в объеме, установленном типовым учебным планом по специальности	1. Материалы для теоретического изучения учебной дисциплины (краткая теория по разделам физики, основные уравнения)
Практический Содержит материалы для проведения лабораторных, практических и иных учебных занятий в объеме, установленном типовым учебным планом по специальности	1. Лабораторный практикум (14 лабораторных работ, таблицы, литература)
Контроля знаний Содержит материалы текущей и итоговой аттестации, иные материалы, позволяющие определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов и учебно-программной документации образовательных программ	1. Вопросы к зачету по курсу «Физика»
Вспомогательный Содержит элементы учебно-программной документации образовательной программы, учебно-методической документации, перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебного предмета (дисциплины)	1. Список основной и дополнительной литературы 2. Электронные учебные ресурсы 3. Электронное сопровождение лабораторных и самостоятельных работ 4. Перечень наглядных и других пособий, методических материалов к техническим средствам, используемым в учебном процессе 5. Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы 6. Учебно-тематический план дисциплины 7. Таблицы

В комплексе органично сочетаются вопросы классической и современной физики, включены основные данные о наиболее важных физических фактах и понятиях, законах и принципах, обозначены границы выполнения изучаемых физических концепций, моделей, теорий, при установке связей, между которыми используется исторический подход. Особое внимание уделяется методологическим проблемам физики как науки, эволюции физических явлений, борьбе гипотез и теорий.

Планируемые практические и лабораторные занятия направлены на приобретение студентами навыков практического использования полученных теоретических знаний при решении конкретных биологических и географических (химических) задач.

Особое место в учебно-методическом комплексе отводится организации самостоятельной работы студентов. Этот вид работы должен органично

включаться в учебный процесс при соединении со всеми формами учебных занятий.

Используемые в рамках данного комплекса программы, пособия, и т.д. позволяют обеспечить проведение образовательного процесса по учебной дисциплине «Физика» в объеме 34 часа лекционных занятий, 4 часов практических занятий и 24 часов лабораторных занятий.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Значение учебного предмета «Физика» определяется той ролью, которую выполняет физическая наука в жизни современного общества, ее влиянием на темпы развития научно-технического прогресса, развитие культуры человека, формирование социально значимых ориентаций, которые обеспечивают гармонизацию отношений человека с окружающей средой. Курс «Физика» для специальности 1-02 05 01 Математика и информатика, как и физика в целом, должен являться эффективным средством повышения уровня знаний студентов и формирования у них умений применять эти знания на практике.

Изучаемый курс «Физика» разбит на следующие разделы:

- элементы механики;
- элементы молекулярной физики;
- электродинамика;
- оптика;
- элементы квантовой физики.

Эти разделы разбиты на соответствующие подразделы, которые включают определенные темы, согласно учебной программе по дисциплине. Основными темами курса являются:

1. Кинематика равномерного и равноускоренного прямолинейных движений. Свободное падение по вертикали.
2. Кинематика движения тела по параболе и окружности. Относительность механического движения. Закон сложения скоростей.
3. Основные понятия и законы динамики. Применение законов Ньютона в решении комбинированных задач на движение тел.
4. Закон всемирного тяготения. Искусственные спутники. Системы связанных тел. Закон Гука. Закон Кулона – Амонта.
5. Законы сохранения в механике. Закон сохранения импульса. Второй закон Ньютона в импульсной форме.
6. Закон сохранения механической энергии. Теоремы о кинетической и потенциальной энергии. Закон сохранения и превращения энергии в механике.
7. Равновесие тел. Законы равновесия тел. Простые механизмы и их применение. Давление твердых тел.
8. Давление в жидкостях и газах. Закон Паскаля. Сообщающиеся сосуды. Гидравлические машины.
9. Молекулярная физика идеального газа. Газовые законы. Изопроцессы. Внутренняя энергия и работа идеального газа.
10. Первый и второй законы термодинамики. Уравнение теплового баланса. Различные тепловые процессы.
11. Электростатика. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Силовые линии электрического поля.

12. Работа электрического поля по перемещению заряда. Потенциал электрического поля в некоторой точке. Разность потенциалов. Связь напряженности и напряжения в однородном электрическом поле.

13. Конденсатор. Батареи конденсаторов с различным соединением. Энергия заряженного конденсатора и батареи. Закон сохранения и превращения энергии в электростатике.

14. Электрический ток и его характеристики. Закон Ома для участка цепи. Последовательное и параллельное соединения проводников. Закон Ома для замкнутой цепи. Работа тока. Закон Джоуля – Ленца.

15. Магнитное поле и его характеристики. Закон Ампера (сила Ампера). Сила Лоренца. Движение частиц в магнитном и электрическом полях.

16. Колебания и волны в механике. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс.

17. Электромагнитные колебания и волны. Колебательный контур. Принцип передачи и приема электромагнитных волн. Переменный ток. Передача электроэнергии.

18. Геометрическая оптика и ее законы. Плоское зеркало, плоскопараллельные пластинки, линзы. Формула тонкой линзы.

19. Волновая оптика. Дифракция. Интерференция.

20. Квантовая физика. Строение атома. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна. Излучение и поглощение фотонов атомом.

Тема 1. Раздел «Элементы механики»

Механика изучает перемещение тел или их частей относительно друг друга в пространстве с течением времени.

Кинематика – изучает движение тел без учета взаимодействием между ними, т. е без учета причин, вызывающих или изменяющих состояние движения.

Динамика – изучает законы движения тел в связи с причинами, которые обуславливают тот или иной характер движения.

Основными уравнениями, раскрывающими содержание физических понятий и описывающими взаимосвязь физических величин и законы механики, являются:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} - \text{скорость равномерного движения.}$$

$$\langle v \rangle = \frac{S}{t} - \text{средняя скорость движения.}$$

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} - \text{ускорение.}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 - \text{закон сложения скоростей.}$$

$$x = x_0 + vt - \text{уравнение равномерного прямолинейного движения.}$$

$x = x_0 + \vartheta_0 t + \frac{at^2}{2}$ – уравнение равноускоренного движения для координаты.

$\vartheta = \vartheta_0 + at$ – уравнение равноускоренного движения для скорости.

$\vartheta_t^2 - \vartheta_0^2 = 2as$ – уравнение равноускоренного движения.

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ – угловая скорость.

$\vartheta = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ – линейная скорость.

$\vartheta = \omega R$ – связь между линейной и угловой скоростями.

$a_{\text{ц}} = \frac{\vartheta^2}{R} = \omega^2 R$ – центростремительное ускорение.

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – связь угловой скорости с периодом (частотой).

$m = \rho V$ – масса однородного тела.

$F = mg$ – сила тяжести.

$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$ – первый закон Ньютона.

$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}$ – второй закон Ньютона.

$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ – третий закон Ньютона.

$F_{\text{упр}} = -kx$ – закон Гука.

$F_{\text{тр}} = \mu N$ – сила трения скольжения.

$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ – закон всемирного тяготения.

$\vec{p} = m\vec{\vartheta}$ – импульс тела.

$m_1 \vec{\vartheta}_1 + m_2 \vec{\vartheta}_2 = m_1 \vec{\vartheta}'_1 + m_2 \vec{\vartheta}'_2$ – закон сохранения импульса.

$\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}$ – импульс силы.

$A = FS \cos \alpha$ – работа постоянной силы.

$N = \frac{A}{t}$ – мощность.

$N = F \vartheta \cos \alpha$ – мгновенная мощность.

$\eta = \frac{A_n}{A_z} 100\%$ – КПД механизма.

$E_{\text{к}} = \frac{m\vartheta^2}{2}$ – кинетическая энергия.

$E_{\text{п}} = mgh$ – потенциальная энергия.

$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ – потенциальная энергия упругой деформации.

$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$ – полная механическая энергия.

$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}$ – закон сохранения механической энергии.

$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$ – условие равновесия твердого тела.

$p = \frac{F}{S}$ – давление.

$p = \rho gh$ – гидростатическое давление.

$F_{\text{А}} = \rho gV$ – закон Архимеда.

Механические колебания – это изменения состояния движения физической системы, которые многократно повторяются через определенные промежутки времени. *Механические волны* – это процесс распространения упругой деформации в среде, которая возникает в результате соприкосновения частиц среды с колеблющимся телом. Задачи по данной теме связаны с расчетом характеристик свободных колебаний математического или пружинного маятника.

Основные уравнения:

$x = A \sin(\omega t + \phi_0)$ – уравнение гармонического колебания.

$T = \frac{t}{N}$ – период колебаний.

$\nu = \frac{1}{T}$ – частота колебаний.

$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ – период колебаний математического маятника.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ – период колебаний пружинного маятника.

$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2}$ – полная энергия гармонических механических колебаний.

$W = \frac{kA^2}{2}$ – полная механическая энергия колеблющейся механической системы.

системы.

Тема 2. Раздел «Элементы молекулярной физики»

Молекулярная физика и термодинамика изучает хаотическое движение большого количества атомов, молекул и их тепловые свойства.

Одной из основных задач *молекулярно-кинетической теории (МКТ)* является выявление количественных соотношений между макроскопическими и микроскопическими параметрами физической системы. Самой простой физической системой в молекулярной физике является газ, находящийся в сосуде в состоянии теплового равновесия.

Термодинамика изучает способы и формы передачи энергии от одной физической системы к другой, закономерности превращения одних видов энергии в другие и направление процессов, происходящих в природе. Физические системы, изучаемые в термодинамике, называются термодинамическими.

Основными уравнениями, раскрывающими содержание физических понятий и описывающими взаимосвязь физических величин и законы молекулярной физики и термодинамики, являются:

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} = \frac{V}{V_M} \text{ – количество вещества (число молей).}$$

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{M}{N_A} \text{ – масса молекулы.}$$

$$p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle \text{ – основное уравнение МКТ.}$$

$$\langle E \rangle = \frac{m_0 \langle \vartheta_{\text{KB}} \rangle^2}{2} \text{ – средняя кинетическая энергия молекулы.}$$

$$\langle \vartheta_{\text{KB}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \text{ – средняя квадратичная скорость молекулы.}$$

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT \text{ – средняя кинетическая энергия одноатомной молекулы.}$$

$$p = nkT \text{ – давление идеального газа.}$$

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \text{ – закон Дальтона.}$$

$T = t + 273$ – соотношение между абсолютной температурой и температурой Цельсия.

$$pV = \frac{m}{M} RT \text{ – уравнение состояния идеального газа (уравнение}$$

Менделеева – Клапейрона).

$$pV = \text{const при } m = \text{const}, T = \text{const} \text{ – закон Бойля – Мариотта.}$$

$$\frac{p}{T} = \text{const при } m = \text{const}, V = \text{const} \text{ – закон Шарля.}$$

$$\frac{V}{T} = \text{const при } m = \text{const}, p = \text{const} \text{ – закон Гей-Люссака.}$$

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \text{ – внутренняя энергия одноатомного идеального газа.}$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T - \text{изменение внутренней энергии.}$$

$$Q = cm(T_2 - T_1) - \text{количество теплоты.}$$

$$Q = \lambda m - \text{количество теплоты, необходимое для плавления тела.}$$

$Q = Lm$ – количество теплоты, необходимое для парообразования жидкости.

$$Q = qm - \text{количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива.}$$

$$Q = A + \Delta U - \text{первый закон термодинамики.}$$

$$A = p \Delta V - \text{работа газа при изобарном процессе.}$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} - \text{КПД теплового двигателя.}$$

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} - \text{максимальное значение КПД теплового двигателя.}$$

$$\phi = \frac{p}{p_0} 100\% = \frac{\rho}{\rho_0} 100\% - \text{относительная влажность.}$$

Тема 3. Раздел «Электродинамика»

Электродинамика изучает взаимодействие электрических и магнитных полей с электрическими зарядами.

Электростатика изучает взаимодействие и условие равновесия покоящихся электрически заряженных тел, а также свойства этих тел, обусловленные электрическими зарядами. Задачи по данной теме можно разделить на три большие группы:

1. Задачи, в которых требуется рассчитать физические величины, характеризующие электростатическое поле данной совокупности зарядов, неподвижных относительно какой-либо ИСО.

2. Задачи на применение законов электростатики в комбинации с кинематико-динамическим или энергетическим способом описания физической системы (движение или равновесие заряженных тел (частиц) в электростатическом поле).

3. Задачи на расчет емкости и энергии плоского конденсатора и на расчет конденсаторных цепей.

В подразделе «*Постоянный ток*» изучается направленное движение электрических зарядов под действием электрического поля, электрические свойства проводников и проводится расчет электрических цепей. По данной теме встречается два типа задач:

1. Задачи на расчет физических характеристик (силы тока, напряжения, сопротивления, мощности и др.) полной цепи или ее участков.

2. Задачи на использование законов постоянного тока в комбинации либо с законами механики, либо с законами термодинамики.

Магнитное поле – это особая форма материи, созданная движущимися (относительно определенной системы отсчета) электрическими зарядами и переменными электрическими полями, посредством которой осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов (токов).

По данной теме предлагаются задачи на определение направления магнитной индукции, силы Ампера и силы Лоренца; на расчет модулей этих величин, а также кинематических и динамических характеристик движения заряженных частиц в магнитном поле.

Основными уравнениями, раскрывающими содержание физических понятий и описывающими взаимосвязь физических величин и законы электродинамики, являются:

$$q = eN - \text{заряд тела.}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \text{ или } F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} - \text{закон Кулона.}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} - \text{напряженность электрического поля.}$$

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} - \text{диэлектрическая проницаемость среды.}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} - \text{напряженность поля точечного заряда.}$$

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i - \text{принцип суперпозиции электрических полей.}$$

$$\sigma = \frac{q}{S} - \text{поверхностная плотность заряда.}$$

$$\varphi = \frac{W}{q_0} - \text{потенциал электростатического поля.}$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} - \text{потенциал поля точечного заряда.}$$

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) - \text{работа поля по перемещению заряда.}$$

$$C = \frac{q}{\varphi} - \text{электроемкость уединенного проводника.}$$

$$C = \frac{q}{U} - \text{электроемкость конденсатора.}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} - \text{электроемкость плоского конденсатора.}$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i - \text{электроемкость батареи конденсаторов при параллельном}$$

соединении.

$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ – емкость батареи конденсаторов при последовательном соединении.

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} \text{ – энергия поля плоского конденсатора.}$$

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \text{ – электродвижущая сила источника.}$$

$$I = \frac{q}{t} = ne \langle \mathfrak{V} \rangle S \text{ – сила постоянного тока.}$$

$$j = \frac{I}{S} \text{ – плотность тока.}$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ – сопротивление проводника.}$$

$$I = \frac{U}{R} \text{ – закон Ома для участка цепи.}$$

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \text{ – сопротивление цепи при последовательном соединении.}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \text{ – сопротивление цепи при параллельном соединении.}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \text{ – закон Ома для полной цепи.}$$

$$I = \frac{n\varepsilon}{R+nr} \text{ – сила тока в цепи, при последовательном соединении}$$

источников.

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}} \text{ – сила тока в цепи, при параллельном соединении источников.}$$

$$A = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t \text{ – работа тока на участке цепи.}$$

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \text{ – мощность тока на участке цепи.}$$

$$Q = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t \text{ – закон Джоуля – Ленца.}$$

$$\eta = \frac{A_n}{A_z} = \frac{R}{R+r} \text{ – КПД источника тока.}$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{M}_{\text{max}}}{IS} \text{ – индукция магнитного поля.}$$

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \text{ – принцип суперпозиции магнитных полей.}$$

$$\mu = \frac{B}{B_0} - \text{магнитная проницаемость среды.}$$

$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$ – индукция магнитного поля прямого бесконечно длинного проводника.

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} - \text{индукция магнитного поля на оси кругового тока.}$$

$$F_A = BIl \sin \alpha - \text{сила Ампера.}$$

$$F_L = qBv \sin \alpha - \text{сила Лоренца.}$$

$$\Phi = BS \cos \alpha - \text{магнитный поток.}$$

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} - \text{закон электромагнитной индукции.}$$

$$\varepsilon_i = vB \sin \alpha - \text{ЭДС индукции в движущемся проводнике.}$$

$$\varepsilon_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} - \text{ЭДС самоиндукции.}$$

$$W = \frac{LI^2}{2} - \text{энергия магнитного поля.}$$

Электромагнитные колебания – это периодические изменения заряда, силы тока, напряжения и связанных с ними напряженности электрического и индукции магнитного полей в электрических цепях. *Электромагнитные волны* – это процесс распространения по всем направлениям электромагнитных колебаний, созданных в какой-нибудь ограниченной области пространства. К данной теме, как правило, относятся:

1. Задачи, в которых необходимо рассчитать характеристики свободных или вынужденных электромагнитных колебаний, используя общие уравнения гармонических колебаний для заряда, силы тока и напряжения.

2. Задачи, в которых необходимо определить параметры идеального колебательного контура.

3. Задачи на расчет энергетических характеристик колебательного контура. Выполнение этих заданий предполагает использование закона сохранения полной энергии идеального контура.

4. Задачи на расчет активной мощности в простейших цепях переменного тока и на расчет характеристик трансформатора (силы тока, напряжения, мощности, коэффициента трансформации и коэффициента полезного действия).

Основные уравнения:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} - \text{период собственных колебаний контура.}$$

$$W = \frac{LI^2}{2} - \text{полная энергия колебательного контура.}$$

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) - \text{мгновенное значение силы переменного тока.}$$

$$I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}} - \text{действующее значение силы тока.}$$

$P = IU$ – мощность переменного тока.

$X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление.

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление.

$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}}$ – закон Ома для цепи переменного тока.

$k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_2}{I_1}$ – коэффициент трансформации.

$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$ – КПД трансформатора.

$y = A \sin \omega(t - \frac{x}{\vartheta}) = A \sin(\omega t - kx)$ – уравнение плоской волны.

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

$\lambda = \vartheta T$ – длина волны.

Тема 4. Раздел «Оптика»

Раздел физики, в котором изучаются природа света, его распространение и взаимодействие с веществом, называется *оптикой*.

Геометрическая оптика – рассматривает законы распространения света в однородных прозрачных средах на основании представлений о световых пучках как о совокупности световых лучей. К основным законам геометрической оптики относятся:

1. Закон прямолинейного распространения света.
2. Закон отражения света.
3. Второй закон преломления света.

Задачи по данной теме условно можно разделить на две основные группы, которые в свою очередь можно разбить на подгруппы.

К первой группе задач относятся задачи на законы отражения на плоской границе раздела двух сред (одно или несколько зеркал).

Ко второй группе относятся задачи на законы преломления: 1) на преломление света на плоской границе двух сред (плоскопараллельная пластина, призма); 2) на построение изображений предметов в тонких линзах; 3) на расчет физических характеристик тонкой линзы и оптических приборов.

Основной *волновая оптика* являются уравнения Дж. Максвелла, который показал, что свет представляет собой электромагнитную волну, скорость распространения которой зависит от свойств среды. Задачи по волновой оптике можно условно разделить на три группы.

К первой группе относятся задачи, в которых определяются физические величины, характеризующие дифракционную картину, получаемую при нормальном падении пучка параллельных лучей на узкую щель или на плоскую

прозрачную дифракционную решетку. Основные уравнения при решении таких задач составляются на основании условий максимума или минимума дифракции на соответствующих объектах.

Ко второй группе относятся задачи, в которых необходимо определить физические величины, характеризующие интерференционную картину в случае сложения двух монохроматических волн, излучаемых точечными когерентными источниками света.

Третья группа – это задачи, в которых необходимо определить физические величины, используя данные, приведенные на шкале электромагнитных волн.

Специальная теория относительности изучает движение тел, движущихся с скоростью близкой к скорости света в вакууме.

Основными уравнениями, раскрывающими содержание физических понятий и описывающими взаимосвязь физических величин и законы раздела оптика и специальная теория относительности, являются:

$i = \alpha$ – закон отражения.

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$ – закон преломления.

$n = \frac{c}{v}$ – абсолютный показатель преломления среды.

$\alpha_{\text{гр}} = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$ – угол полного внутреннего отражения.

$D = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{с}}} - 1\right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$ – оптическая сила линзы.

$D = \frac{1}{F}$ – оптическая сила линзы.

$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n$ – оптическая сила системы линз.

$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}$ – формула тонкой линзы.

$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$ – увеличение линзы.

$\Gamma = \frac{d_0}{F}$ – увеличение лупы.

$L = nl$ – оптическая длина пути светового луча.

$\Delta L = L_2 - L_1$ – оптическая разность хода двух световых лучей.

$\Delta L = 2k \frac{\lambda}{2}$ – условие интерференционного максимума.

$\Delta L = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ – условие интерференционного минимума.

$d \sin \varphi = k\lambda$ – условие максимума для дифракционной решетки.

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ – длина движущегося тела.}$$

$$\Delta t = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ – промежуток времени по движущимся часам.}$$

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v'u}{c^2}} \text{ – релятивистский закон сложения скоростей.}$$

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ – релятивистская масса тела.}$$

$$E = mc^2 \text{ – полная энергия тела.}$$

$$E_0 = m_0 c^2 \text{ – энергия покоя тела.}$$

$$T = E - E_0 = (m - m_0)c^2 \text{ – кинетическая энергия тела.}$$

Тема 5. Раздел «Элементы квантовой физики»

В квантовой физике изучаются закономерности явлений и процессов, происходящих в микромире. Объектами, которые исследует квантовая физика, являются элементарные частицы, ядра атомов, атомы, молекулы и их системы.

Квантовые свойства света – излучение и поглощение света веществом происходит не непрерывно, а конечными порциями, или квантами.

Согласно Эйнштейну, если энергия колебаний атомов квантуется, то по закону сохранения энергии они должны излучать свет квантами с такой же энергией. Это означает, что свет не только излучается, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных порций энергии – квантов электромагнитного излучения. Эти кванты были названы фотонами. При взаимодействии с веществом фотоны могут испускаться, поглощаться и рассеиваться. Сохранение числа фотонов не имеет места. Зато должны выполняться законы сохранения энергии и импульса.

Энергия связи атомных ядер – энергия связи есть мера прочности ядра. Она в большей мере зависит от числа нуклонов в ядре и в меньшей мере – от отношения числа протонов к числу нейтронов в этом ядре. Более точную информацию об устойчивости ядра относительно вылета из него одного нуклона можно получить, если известна удельная энергия связи.

Ядерные реакции – решение задач по ядерной физике осуществляется на основе законов сохранения (закон сохранения полной энергии, закон сохранения импульса, закон сохранения заряда, закон сохранения числа нуклонов), которые в микромире имеют определенную специфику.

По данному разделу студентам можно предложить четыре основных типа задач:

1. Задачи, в которых необходимо определить физические характеристики фотонов, т. е. их энергию, импульс или их число.

2. Задачи, в которых рассматривается поглощение фотонов отдельными электронами вещества (фотоэффект). Для решения таких задач используется уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

3. Задачи, в которых рассматриваются процессы излучения и поглощения энергии атомом.

4. Задачи, в которых необходимо определить физические величины, характеризующие конкретную ядерную реакцию или процесс радиоактивного распада.

Основными уравнениями, раскрывающими содержание физических понятий и описывающими взаимосвязь физических величин и законы раздела квантовая физика, являются:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} - \text{энергия фотона.}$$

$$\lambda\nu = c - \text{связь длины волны и частоты.}$$

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c} - \text{масса фотона.}$$

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} - \text{импульс фотона.}$$

$$h\nu = A + \frac{m\vartheta_{\max}^2}{2} - \text{уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.}$$

$$\frac{m\vartheta_{\max}^2}{2} = eU_3 - \text{максимальная кинетическая энергия фотона.}$$

$$\nu_k = \frac{A}{h} - \text{красная граница фотоэффекта.}$$

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2} - \text{радиус орбиты электрона в атоме водорода.}$$

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} - \text{полная энергия электрона в атоме водорода.}$$

$$m\vartheta r = n \frac{h}{2\pi} - \text{первый постулат Бора (условие квантования орбит).}$$

$$E_{\text{пол}} = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} - \text{второй постулат Бора (условие стационарных орбит).}$$

$$h\nu = E_2 - E_1 - \text{третий постулат Бора (правило частот).}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) - \text{формула Бальмера.}$$

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_z - \text{дефект массы атомного ядра.}$$

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 - \text{энергия связи атомного ядра.}$$

$$E = \left(\sum m_1 - \sum m_2 \right) \cdot c^2 - \text{энергетический выход ядерной реакции.}$$

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} = N_0 e^{-\lambda t} - \text{закон радиоактивного распада.}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} - \text{связь периода полураспада с постоянной распада.}$$

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Лабораторный практикум по курсу общей физики предназначен для студентов факультета естествознания 1-01 04 01 Биология и химия, 1-01 04 02 Биология и география. Включает 14 лабораторных работ по основным разделам физики.

Цель написания данного учебно-методического пособия – оказать помощь студентам в усвоении фундаментальных принципов и законов физики и их приложений к объяснению многих явлений, изучаемых в биологии, химии, географии.

Содержание практикума соответствует новой учебной программе и представляет широкий выбор для выполнения лабораторных работ в зависимости от количества часов учебного плана и других причин.

Успешное выполнение студентами лабораторных работ предполагает их активную самостоятельную работу. С этой целью в каждую лабораторную работу включен перечень приборов и принадлежностей, введение, в котором содержится теоретическое обоснование работы, описание экспериментальной установки и хода работы. Приводятся контрольные вопросы по ее содержанию и выполнению.

При написании практикума использовались такие источники, как учебные пособия по курсу физики, лабораторные практикумы, энциклопедические издания по физике.

Приведенный список литературы поможет студенту глубже разобраться в изучаемых физических законах, явлениях.

Предлагаемое издание может быть использовано студентами других факультетов БГПУ, где изучается курс общей физики.

Тематика лабораторного практикума:

Лабораторная работа № 1. Определение линейных размеров, массы, тока, напряжения. Изучение электроизмерительных приборов.

Лабораторная работа № 2. Изучение прямолинейного движения тел в поле силы тяжести на машине Адвуда.

Лабораторная работа № 3. Определение скорости движения воздушного потока в трубке Вентури. Измерение кровяного давления.

Лабораторная работа № 4. Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости.

Лабораторная работа № 5. Определение модуля упругости костной ткани.

Лабораторная работа № 6. Определение вязкости газов .

Лабораторная работа № 7. Определение отношения теплоемкостей газа методом Клемана – Дезорма.

Лабораторная работа № 8. Определение абсолютной и относительной влажности воздуха.

Лабораторная работа № 9. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давления.

Лабораторная работа № 10. Определение среднего теплового коэффициента линейного расширения тел.

Лабораторная работа № 11. Исследование магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

Лабораторная работа № 12. Изучение дифракционной решетки.

Лабораторная работа № 13. Дозиметрия ионизирующих излучений.

Лабораторная работа № 14. Измерение времени соударения шаров. Статистический метод оценки случайных погрешностей.

Лабораторная работа № 1

Определение линейных размеров, массы, тока, напряжения.

Изучение электроизмерительных приборов

Приборы и принадлежности: линейка, штангенциркуль, микрометр, исследуемые тела, весы, разновесы, амперметр, вольтметр, реостат, источник постоянного тока, двойной переключатель, магазин сопротивлений, соединительные провода.

Введение

Измерение – экспериментальное определение значения измеряемой величины с применением средств измерений. К средствам измерений относятся меры, измерительные показывающие и регистрирующие приборы, измерительные системы и т. д. Результат измерения выражается числом или совокупностью чисел, именованных или неименованных в зависимости от того, размерной или безразмерной является измеряемая величина.

Прямыми называют измерения, при которых искомая величина определяется непосредственным сравнением. **Косвенными** – при которых искомая величина вычисляется по результатам измерений других величин, связанных с ней определенной функциональной зависимостью. Наиболее близким к истинному значению измеряемой величины по результатам n **прямых** измерений будет их среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (1)$$

Цель любого измерения заключается в нахождении приближенного значения измеряемой величины, а также в оценке допускаемой погрешности. Погрешности измерений по характеру повторяемости делятся на **систематические** и **случайные**. **Систематическими** называют погрешности, которые сохраняют или закономерно изменяют свой знак и величину от опыта к опыту (из-за неправильной установки или неисправности прибора, неправильного отсчета показаний и т. д.). Их можно обнаружить и устранить **поверкой** измерительных приборов или выбором более точного метода измерений.

Случайные – погрешности, непредсказуемым образом изменяющие свой знак и величину от опыта к опыту (вследствие несовершенства органов чувств, плохой повторяемости показаний прибора, изменения температуры, движения окружающего воздуха и т. п.). Полностью устранить случайные погрешности невозможно, но их можно оценить методами теории вероятностей.

Для измерения линейных размеров используется **линейка**, **штангенциркуль** и **микрометр**. **Цена деления** линейки c равна расстоянию между соседними штрихами, **точность** $\Delta_{отс.}$ равна половине цены деления:

$$\Delta_{отс.} = \frac{c}{2} \quad (2)$$

Для повышения точности измерений служит **нониус** – дополнительная линейка к основной шкале. Нониус рассчитывается так, что m делений нониуса соответствует $(m-1)$ делению основной шкалы.

Точность прибора с нониусом зависит от числа делений нониуса m и цены деления основной шкалы c :

$$\Delta_{отс.} = \frac{c}{m} \quad (3)$$

Штангенциркуль представляет собой линейку 1 с неподвижной ножкой 2 (рис. 1). По линейке перемещается дополнительная шкала с m делениями – нониус 3. На линейке нанесена основная шкала с ценой деления 1 мм. Точность штангенциркуля зависит от числа делений нониуса (так при $m=10$ точность $\Delta_{отс.} = \frac{c}{m} = \frac{1}{10} = 0,1\text{мм}$, при $m=20$ точность $\Delta_{отс.} = \frac{c}{m} = \frac{1}{20} = 0,05\text{мм}$).

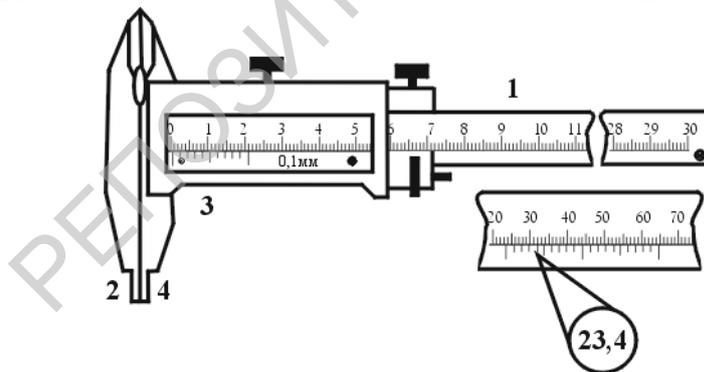


Рис. 1

Чтобы измерить длину предмета l , его помещают между ножками 2 и 4, снимают отсчет по шкалам, используя формулу

$$l = k \cdot c + n \cdot \frac{c}{m} \quad (4)$$

где k – число наименьших делений основной шкалы (до нулевого деления нониуса), n – номер деления нониуса, которое в данный момент совпадает с одним из делений основной шкалы.

$$\text{Для случая на рисунке 1: } l = 23 \cdot 1 + 4 \cdot \frac{1}{10} = 23,4 \text{ мм}$$

Штрих – черточка, нанесенная на основную шкалу или дополнительную линейку.

Деление – расстояние между ближайшими штрихами.

В некоторых штангенциркулях при измерениях внутренних диаметров необходимо прибавлять толщину обеих ножек (указывается на одной из них).

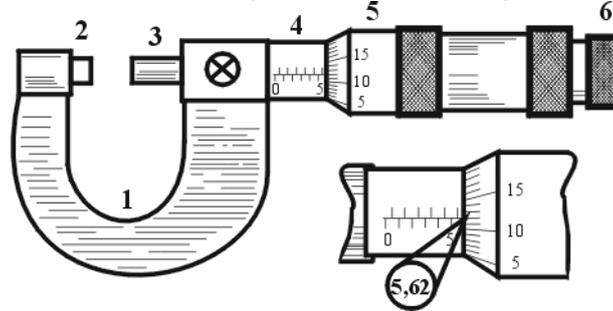


Рис. 2

Микрометр состоит из скобы 1 упора 2, микрометрического винта 3, стебля 4, барабана 5 и головки с трещоткой 6 (рис. 2). На стебле нанесена основная шкала. Деления на ней отстоят друг от друга на 0,5 мм и смещены относительно оси стебля. На барабане нанесено $m = 50$ делений нониуса, поэтому точность микрометра

$$\Delta_{\text{отс.}} = \frac{c}{m} = \frac{0,5}{50} = 0,01 \text{ мм.}$$

При измерениях предмет помещают между упором 2 и микрометрическим винтом 3, вращают винт за головку 6 до соприкосновения с предметом и срабатывания трещотки. Числовое значение размера измеряемого предмета находят по формуле:

$$l = k \cdot c + n \cdot \frac{c}{m} \quad (4')$$

где k – число делений основной шкалы на стебле, n – номер деления шкалы нониуса на барабане, совпадающего с осью основной шкалы.

Для случая на рисунке 2: $l = 11 \cdot 0,5 + 12 \cdot \frac{0,5}{50} = 5,62 \text{ мм.}$

Основной динамической характеристикой тела является **масса тела**. Масса определяет инерционные и гравитационные свойства тела. За **единицу** массы принимают массу определенного эталонного тела. Единица массы, называемая килограммом (кг), входит в число семи основных единиц системы СИ.

Сила притяжения, действующая со стороны Земли на все тела, называется **силой тяжести**. За единицу силы в системе СИ принят 1Н (1 Ньютон).

Сила \vec{P} , с которой тело действует на подвес или опору, называется **весом тела**. Если опора (или подвес) неподвижны относительно Земли, то вес тела \vec{P} будет равен силе тяжести:

$$\vec{P} = m\vec{g} \quad (5)$$

Необходимо помнить, что вес тела и сила тяжести приложены к разным телам: \vec{F}_T – к самому телу, \vec{P} – к подвесу или опоре, ограничивающим

свободное движение тела в поле сил земного тяготения (рис. 3). По III закону Ньютона, вес численно равен силе, с которой опора действует на тело, т. е. реакции опоры. Поэтому вес можно находить по реакции опоры.

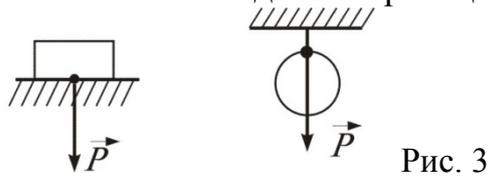


Рис. 3

Вес тела как сила, действующая на подвес или опору вследствие притяжения тела к Земле, определяется при помощи **пружинных** весов (динамометра). Следует заметить, что сопоставить вес нескольких тел можно в случае, когда они определены при одинаковых условиях и в одном и том же месте. В подобных условиях с помощью динамометра сравниваются и массы тел, так как вес разных тел при этом будет пропорциональным их массам

Пропорциональность веса различных тел, находящихся в одинаковых условиях и в одном и том же месте, их массе позволяет сравнивать массу тел с помощью **рычажных** весов. Из условия равновесия равноплечего рычага (тела, имеющего ось вращения) (рис. 4) следует, что силы, действующие на него, равны между собой, т. е. вес тела равен весу подвешенных гирь: $P_1 = P_2$.



Рис. 4

Из пропорциональности весов и масс тел получаем, что $m_1 = m_2$. Зная массу гирь, определяем массу тела. Имея набор гирь-эталонов, можно измерить массу любого тела. Для взвешивания тел пользуются весами (техническими, аналитическими и др.). Для точного взвешивания обычно применяются аналитические весы, заключенные в стеклянный шкафчик для предохранения от пыли и воздушных потоков.

Чтобы произвести точное взвешивание, необходимо:

1) определить **нулевую точку весов** N_0 – то деление шкалы, на котором останавливается стрелка, когда коромысло перестает колебаться;

2) их **чувствительность** α – отношение числа делений шкалы n , на которое смещается стрелка, к массе дополнительного перегрузка Δm , вызвавшего это смещение:

$$\alpha = \frac{n}{\Delta m}, \quad (7)$$

где $[\alpha] = \frac{\text{дел}}{\text{мг}}$. Величина, обратная чувствительности, называется **ценой деления** – масса перегрузка, вызывающего смещение стрелки на одно деление:

$$c = \frac{\Delta m}{n}, \quad (8)$$

3) уравновесить весы;

4) ввести поправку на потерю веса тела в воздухе.

При взвешивании на левую чашку весов кладут взвешиваемое тело, на правую – разновесы, приблизительно соответствующие весу тела.

Электроизмерительным прибором называется устройство, предназначенное для измерения различных электрических величин: тока, напряжения, сопротивления, мощности и др. Классификация приборов по роду измеряемой величины и их условное обозначение приведено в таблице 1.

Таблица 1

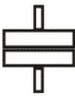
Обозначение приборов по роду измеряемой величины

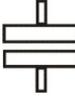
Измеряемая величина	Название прибора	Условное обозначение
Сила тока	Амперметр	A
	Миллиамперметр	mA
	Микроамперметр	μA
Напряжение	Вольтметр	V
	Милливольтметр	mV
Мощность	Ваттметр	W
Электрическая энергия	Счетчик электрической энергии	Wh
Сопротивление	Омметр	Ω
Емкость	Фарадометр	F
Индуктивность	Генриметр	H
Частота	Частотомер	Hz

По принципу действия все электроизмерительные приборы делятся на следующие системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую, термоэлектрическую, электронную, электростатическую, индукционную и. вибрационную.

 Работа приборов **магнитоэлектрической системы** основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток.

 Взаимодействие магнитного поля катушки с током с подвижным ферромагнитным стержнем, помещенным в это поле, лежит в основе работы приборов **электромагнитной системы**.

 Работа приборов **электродинамической системы** основана на магнитном взаимодействии катушек, по которым протекает измеряемый электрический ток.

 Принцип работы прибора **электростатической системы** основан на взаимодействии двух или нескольких заряженных проводников.

 Устройство приборов **индукционной системы** основано на взаимодействии токов, индуцируемых в подвижной части прибора, с магнитным полем неподвижных электромагнитов.



Работа приборов **вибрационной системы** основана на резонансе при совпадении частот собственных колебаний подвижной части системы с частотой переменного тока.



Принцип действия приборов **тепловой системы** основан на изменении длины проводника, по которому протекает ток вследствие его нагревания.

При выполнении электрических измерений используют ряд специфических понятий.

Отсчет: численный параметр, устанавливаемый по шкале прибора подсчетом числа делений, на которые отклоняется стрелка прибора, или подсчетом меток, сигналов физического прибора.

Показание: значение физической величины, соответствующее отсчету.

Предел измерений – предельное значение измеряемой величины, на которое рассчитан прибор. Часто измерительные приборы имеют не один, а несколько пределов измерений.

Цена деления прибора c – значение измеряемой величины на выбранном пределе измерений, вызывающее отклонение стрелки указателя на одно деление шкалы:

$$c = \frac{A_m}{N}, \quad (9)$$

где A_m – предел измерения прибора, N – число делений на его шкале.

Для неравномерной шкалы

$$c = \frac{\Delta A}{\Delta N}, \quad (10)$$

где ΔA – изменение измеряемой величины, ΔN – соответствующее значение отсчета по шкале прибора.

Для получения отсчета показаний прибора необходимо определить цену его деления для избранного предела измерений и умножить ее на число отсчитанных делений против стрелки прибора:

$$A_{\text{измер.}} = c \cdot N_{\text{изм.}} \quad (11)$$

Величина α называется **чувствительностью** прибора

$$\alpha = \frac{1}{c} \quad (12)$$

Точность электроизмерительных приборов определяется в виде абсолютных и относительных погрешностей. Для электроизмерительных приборов наиболее характерным является выражение точности измерений через приведенную погрешность (т. е. отнесенную к пределу шкалы).

Для электроизмерительных приборов установлено **9 классов точности**, которые обозначаются на их шкале соответствующими числами: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Класс точности прибора характеризует допустимую для данного типа прибора относительную погрешность:

$$\gamma = \frac{\Delta A_m}{A_m} 100\% , \quad (13)$$

где ΔA_m – максимальная абсолютная погрешность прибора, A_m – выбранный предел измерений прибора

Зная класс точности прибора, можно вычислить его максимальную абсолютную погрешность, являющуюся **граничной абсолютной погрешностью измеряемой величины**:

$$\Delta A_m = \frac{\gamma A_m}{100\%} \quad (14)$$

Относительная погрешность измеряемой величины вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_m}{A_{измер.}} \cdot 100\% = \frac{\gamma \cdot A_m}{A_{измер.}} \quad (15)$$

Для удобства эксплуатации приборов их технические характеристики, условия эксплуатации и конструктивные данные в виде условных обозначений наносятся на шкалах и корпусах приборов. На корпусе указывается полярность клемм (у приборов магнитоэлектрической системы), пределы измерений. На шкале прибора указаны:

- 1) род измеряемой величины (табл. 1);
- 2) условное обозначение прибора;
- 3) система, к которой относится прибор;
- 4) рабочий ток прибора, класс точности, рабочее положение, прочность изоляции, влияющие величины и т. д.

Кроме указанных обозначений, на шкале приборов наносят обозначения, характеризующие устойчивость приборов к климатическим условиям:

А – приборы, предназначенные для работы в сухих отапливаемых помещениях ($+10^{\circ}\text{C} - +35^{\circ}\text{C}$).

Б – приборы, предназначенные для работы в закрытых не отапливаемых помещениях ($-30^{\circ}\text{C} - +50^{\circ}\text{C}$).

В – приборы, предназначенные для работы в полевых и морских условиях ($-50^{\circ}\text{C} - +80^{\circ}\text{C}$).

Систему прибора (принцип действия), кроме вышеуказанных символов, могут также характеризовать и буквенные индексы, например:

М – прибор магнитоэлектрической системы.

Э – прибор электромагнитной системы.

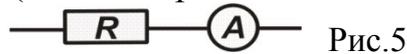
Д – прибор электродинамической системы.

С – прибор электростатической системы и т. д.

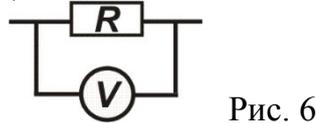
Основными приборами при выполнении электрических измерений являются **амперметр** и **вольтметр**.

Для измерения величины (силы) тока в проводнике амперметр включается в электрическую цепь последовательно (рис. 5). Амперметр имеет

собственное сопротивление R_A . Чтобы это сопротивление не влияло на величину измеряемого амперметром тока, оно должно быть как можно меньше внешнего сопротивления R (часто сопротивление называют резистором).



Вольтметр включается **параллельно** тому участку цепи, на котором измеряется напряжение (рис. 6).



Чтобы свести к минимуму его влияние на измеряемое напряжение, сопротивление вольтметра R_B должно быть по возможности значительно больше сопротивления резистора R .

Выполнение работы

Упражнение 1. Измерение толщины пластинки и диаметра проволоки с помощью микрометра.

1. Определите цену деления основной шкалы микрометра c_m , учитывая, что она равна расстоянию между соседними штрихами, и точность прибора по формуле: $\Delta_{omc} = \frac{c_m}{m}$, где m – число делений нониуса микрометра.

2. Используя формулу (4') и пример на рисунке 2, определите толщину пластинки h_i не менее 3 раз. Найдите среднее значение $\langle h \rangle$.

3. Используя формулу (4') и пример на рисунке 2, измерьте в различных местах диаметр проволоки d_i не менее 3 раз. Найдите среднее значение $\langle d \rangle$.

Упражнение 2. Определение объема трубки.

1. Определите цену деления основной шкалы штангенциркуля $c_{шт}$, учитывая, что она равна расстоянию между соседними штрихами, и точность прибора по формуле: $\Delta_{omc} = \frac{c_{шт}}{m}$, где m – число делений нониуса штангенциркуля

2. Используя формулу (4) и пример на рисунке 1, измерьте штангенциркулем не менее 3 раз внутренний d_i , внешний D_i диаметры трубки и ее высоту h_i .

3. Найдите среднее значение $\langle d \rangle, \langle D \rangle, \langle h \rangle$.

4. Вычислите среднее значение объема по формуле $\langle V \rangle = \frac{\pi \langle h \rangle}{4} (\langle D \rangle^2 - \langle d \rangle^2)$.

5. Результаты оформите в виде таблицы:

№	$d_i,$ $10^{-3} м$	$\langle d \rangle,$ $10^{-3} м$	$D_i,$ $10^{-3} м$	$\langle D \rangle,$ $10^{-3} м$	$h_i,$ $10^{-3} м$	$\langle h \rangle,$ $10^{-3} м$	$\langle V \rangle,$ $10^{-9} м^3$

Упражнение 3. Взвешивание на технических весах.

1. Определите нулевую точку ненагруженных весов N_0 .
2. Определите чувствительность α ненагруженных весов, используя формулу (7). В качестве перегрузки Δm возьмите 50 мг или 100 мг.
3. Определите цену деления c , используя формулу (8).
4. Определите массы разных тел.

Упражнение 4. Ознакомление с электроизмерительными приборами.

Запишите название каждого из представленных приборов, его назначение, укажите систему, к которой он принадлежит и принцип работы прибора данной системы; постоянный (значок на приборе имеет вид $-$) или переменный (значок на приборе имеет вид \square) ток или напряжение он может измерять, пределы его измерений, класс точности, рабочее положение (\perp – положение).

Рассчитайте цену деления для каждого предела измерительных приборов.

Соберите электрическую цепь, позволяющую измерить силу тока I , проходящего через магазин сопротивлений R и напряжение U на данном сопротивлении (рис. 7).

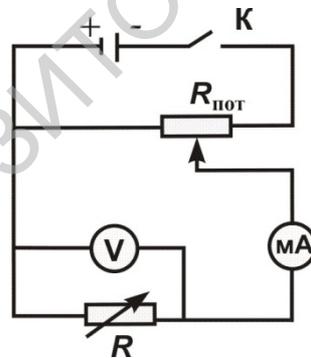


Рис. 7

Контрольные вопросы

1. Что значит измерить физическую величину?
2. Какие измерения называют прямыми? Косвенными?
3. В чем состоит цель любого измерения?
4. Какие погрешности называют систематическими? Как их устранить?
5. Какие погрешности называют случайными? Как их можно оценить?
6. Как определить цену деления линейки, ее точность?
7. Как устроены штангенциркуль, микрометр?
8. Для чего служит нониус? От чего зависит точность прибора с нониусом?
9. Как производятся измерения микрометром и штангенциркулем?
10. Что такое масса тела? В каких единицах она измеряется?

11. Дать определение силы тяжести, веса тела. Указать точки приложения этих сил?

12. Что называют нулевой точкой? Ценой деления? Чувствительностью весов? Как определяются эти величины?

13. Дать определение электроизмерительного прибора.

14. Расскажите о строении и принципе работы электроизмерительных приборов различных систем.

15. Дать определение цены деления электроизмерительного прибора и как она используется при снятии показаний?

16. Дать определение класса точности электроизмерительного прибора и как он используется при подсчете погрешностей показаний приборов.

Лабораторная работа № 2

Изучение прямолинейного движения тел в поле силы тяжести на машине Атвуда

Приборы и принадлежности: машина Атвуда с грузами и перегрузками, кольцевой платформой, сплошной платформой и электромагнитом; два электронных секундомера, блок управления.

Введение

Механика – раздел физики, изучающий механическое движение материальных тел и существующие при этом взаимодействия между ними.

Механическое движение – изменение с течением времени взаимного положения тел или их частей относительно друг друга в пространстве.

Раздел механики, изучающий движение тел без учета взаимодействий между ними, это значит без выяснения причин, которые вызывают и изменяют состояние движения, называется **кинематикой**.

Динамика – раздел механики, в котором изучается движение тел как результат их взаимодействия. Чтобы изучать механику, введем некоторые понятия. **Материальная точка** – тело, формой, внутренней структурой и размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Линия, которую описывает материальная точка при движении в пространстве, называется **траекторией**. В зависимости от вида траектории различают **прямолинейное движение** (траектория – прямая линия) и **криволинейное движение** (траектория – кривая линия). Измеряя расстояние от начальной точки движения (1) до конечной (2) вдоль траектории, получаем **длину пути** ΔS (рис. 1). Вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени Δt есть **перемещение** $\Delta \vec{r}$.

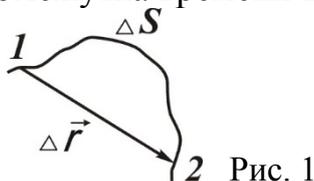


Рис. 1

Чтобы описать механическое движение тела (точки), нужно знать его координаты в любой момент времени. Для определения координат материальной точки следует, прежде всего, выбрать **тело отсчета** и связать с ним систему координат. Телом отсчета в механике часто служит Земля, с которой связывается прямоугольная декартова система координат. Для определения положения материальной точки в любой момент времени необходимо также задать начало отсчета времени.

Совокупность системы координат, тела отсчета, с которым она связана, и часов представляют собой **систему отсчета**, относительно которой рассматривается движение тела.

Траектория движения тела, пройденный путь и перемещение зависят от выбора системы отсчета. Другими словами, **механическое движение относительно**.

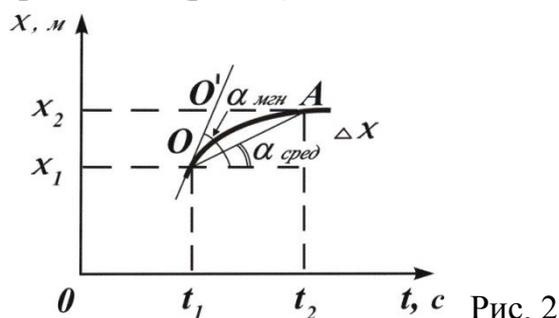
Для количественной оценки быстроты перемещения тела, вводится понятие **скорости движения**. Различают **мгновенную скорость** и **среднюю скорость** движения тела. **Средней скоростью** неравномерного движения называют отношение вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ к промежутку времени Δt , за который это перемещение совершено:

$$\vec{v}_{\text{сред}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (1)$$

Мгновенная скорость – скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории. Вектор **мгновенной скорости** равен пределу отношения вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ к промежутку времени Δt при бесконечном его уменьшении ($\Delta t \rightarrow 0$), т. е. первой производной вектора перемещения по времени, и направлен по касательной к траектории:

$$\vec{v}_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{v}_{\text{сред}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (2)$$

Проиллюстрируем понятия $\vec{v}_{\text{сред}}$ и $\vec{v}_{\text{мгн}}$ с помощью графика зависимости координаты x тела от времени t (рис. 2).



Из графика видно, что **мгновенная скорость** в момент времени t_1 равна тангенсу угла наклона касательной OO' , т. е.

$$v_{\text{мгн}} = \frac{dx}{dt} = \text{tg} \alpha_{\text{мгн}} \quad (3)$$

средняя же скорость на интервале $\Delta x = x_2 - x_1$ за время $\Delta t = t_2 - t_1$ равна тангенсу угла наклона прямой ОА, т. е.

$$\mathfrak{V}_{\text{сред}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{tg} \alpha_{\text{сред}} \quad (4)$$

Движение, при котором материальная точка за **любые равные промежутки времени** Δt совершает одинаковые перемещения $\Delta \vec{r}$ (при прямолинейном движении проходит одинаковые пути ΔS) называют **равномерным прямолинейным движением** ($\mathfrak{V}_{\text{сред}} = \mathfrak{V}_{\text{мгн}} = \mathfrak{V}$).

Равномерное прямолинейное движение – это движение с постоянной по величине (модулю) и направлению скоростью ($\vec{\mathfrak{V}} = \text{const}$).

График зависимости скорости тела \mathfrak{V} от времени t для равномерного прямолинейного движения имеет вид (рис. 3).

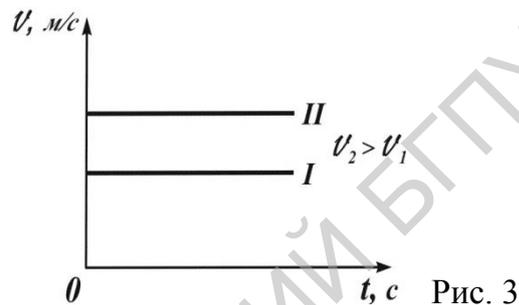
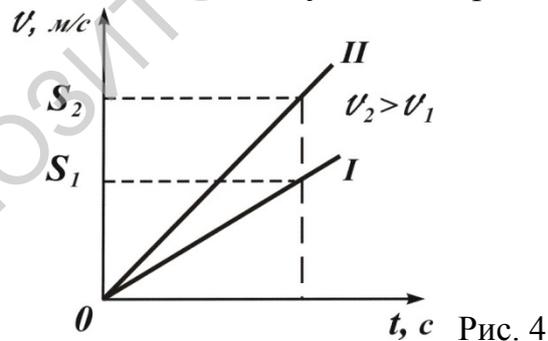


График зависимости пути S от времени t для равномерного прямолинейного движения выглядит следующим образом (рис. 4).



Скорость движения тела может меняться как по величине (модулю), так и по направлению. Быстрота изменения скорости характеризуется **вектором ускорения** \vec{a} .

Различают **среднее ускорение** и **мгновенное ускорение**. Вектор **среднего ускорения** равен отношению вектора изменения скорости $\Delta \vec{\mathfrak{V}}$ к промежутку времени Δt , за который произошло это изменение, и направлен вдоль вектора изменения скорости $\Delta \vec{\mathfrak{V}}$:

$$\vec{a}_{\text{сред}} = \frac{\Delta \vec{\mathfrak{V}}}{\Delta t} \quad (5)$$

Вектор **мгновенного ускорения** равен пределу отношения вектора изменения скорости $\Delta \vec{\mathfrak{V}}$ к промежутку времени Δt при бесконечном его

уменьшении ($\Delta t \rightarrow 0$), т. е. первой производной вектора скорости по времени или второй производной вектора перемещения по времени:

$$\vec{a}_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \vec{v}_{\text{сред}} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (6)$$

При прямолинейном движении скорость может изменить только величину (модуль), поэтому

$$a_{\text{мгн}} = \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Движение, при котором материальная точка за любые равные промежутки времени Δt изменяет свою скорость на одну и ту же величину Δv , называется **равнопеременным**. Причем, если скорость увеличивается ($\Delta v > 0$) на одинаковую величину за любые равные промежутки времени, то движение **равноускоренное**, т. е. ускорение для такого движения постоянно по модулю и направлению:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \text{const} \quad (8)$$

а проекция вектора ускорения на ось, совпадающую с направлением движения, положительная ($a_x > 0$) (рис. 5).

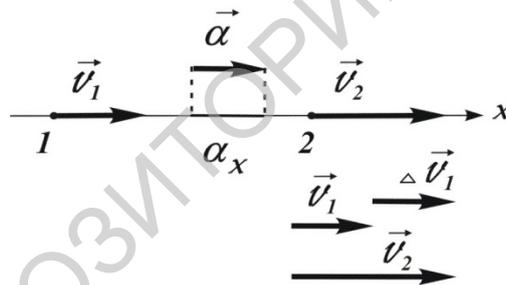


Рис. 5

Если скорость материальной точки **уменьшается** на одинаковую величину за любые равные промежутки времени, то векторы ускорения и скорости противоположно направлены и проекция ускорения на эту же ось отрицательная ($a_x < 0$) (рис. 6).

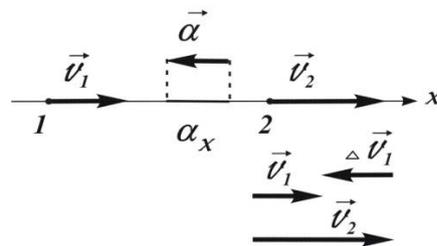
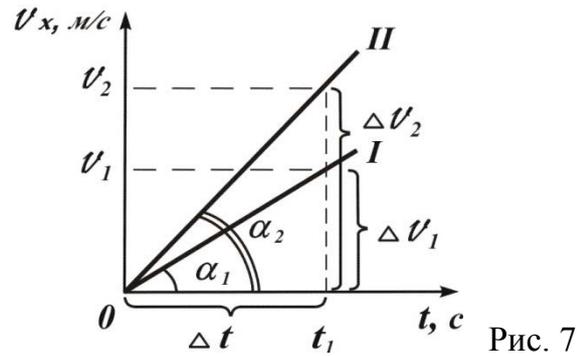


Рис. 6

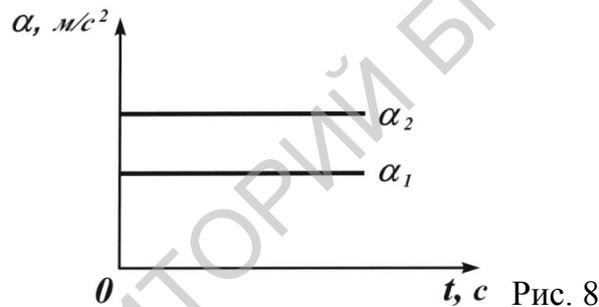
Графики зависимости проекции скорости тела v_x от времени t для равноускоренных движений в случае, если начальная скорость $v_{0x} = 0$, будут иметь вид (рис. 7).



Чем больше угол наклона прямой $\vartheta_x(t)$, тем с большим ускорением движется материальная точка, т. к.

$$a = \operatorname{tg} \alpha \quad (9)$$

Графики зависимости ускорения от времени для равноускоренных движений I и II представлены на рис. 8.



Зависимость скорости движения материальной точки от времени в общем виде следующая:

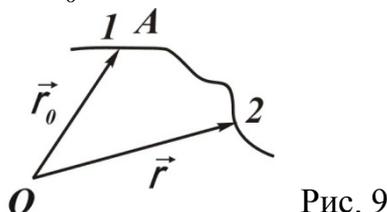
$$\vec{\vartheta} = \vec{\vartheta}_0 + \vec{a}t \quad (10)$$

где $\vec{\vartheta}_0$ – скорость материальной точки в момент времени $t_0 = 0$.

Положение точки A в любой момент времени t определяется **радиус-вектором** \vec{r} , проведенным с начала отсчета (т. 0) в данную точку A (рис. 9) и зависящим от времени по следующему закону:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\vartheta}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \quad (11)$$

где \vec{r}_0 – радиус-вектор, определяющий положение материальной точки в момент времени $t_0 = 0$; \vec{a} – ускорение материальной точки; $\vec{\vartheta}_0$ – скорость материальной точки в момент времени $t_0 = 0$.



При движении материальной точки вдоль оси Ox зависимости проекции скорости и координаты от времени имеют вид:

$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad (12)$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \quad (13)$$

Описание установки и метода

Для изучения прямолинейного движения тел используют машину Атвуда (рис. 10), которая состоит из вертикальной стойки (1) со шкалой, вдоль которой движутся грузы (3). На верхнем конце стойки укреплен легкий блок (2), вращающийся с малым трением. Через блок перекинута тонкая нить с грузами (3), масса которых может быть увеличена добавочными небольшими грузами (7). Электромагнитный пускатель (4) служит для пуска и остановки грузов. Время их движения измеряется электронными секундомерами (C_1 и C_2 рис. 11). В нижней части стойки закреплена подвижная платформа (5), предназначенная для разрыва цепи электронного секундомера и прекращения счета времени в момент соприкосновения грузов с чашкой платформы. Кольцевая платформа (6) служит для снятия с правого груза перегрузка. Такая конструкция установки дает возможность наблюдать **равноускоренное движение** груза вместе с перегрузком на участке пути S_1 от начального положения груза до кольцевой платформы (6) и **равномерное движение** (по инерции) на участке S_2 от кольцевой до сплошной платформы (5).

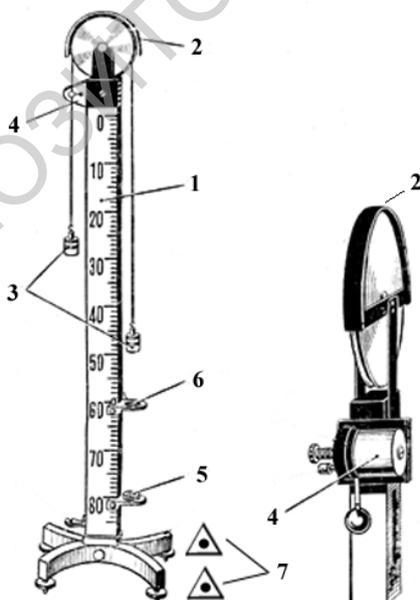


Рис. 10

Электрическая схема установки приведена на рис. 11. Вид передней панели управления изображен на рис. 12. При замыкании ключа П напряжение подается на электромагнит (4), который, прижимая нить, фиксирует положение грузов.

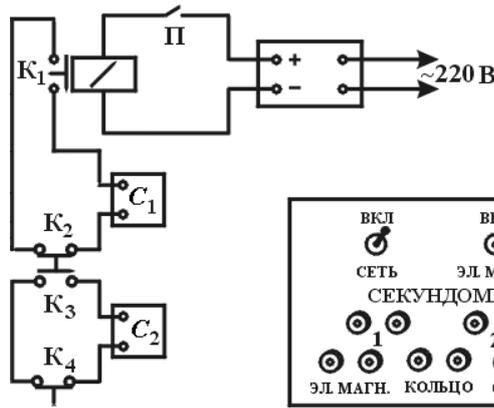


Рис. 11

Рис. 12

При размыкании ключа П электромагнит освобождает нить, и грузы (под действием перегрузка) начинают равноускоренное движение. При этом замыкается контакт K_1 , и включается электронный секундомер C_1 измеряющий время t_1 равноускоренного движения груза с перегрузком на участке S_1 .

При прохождении грузом кольцевой платформы (6) перегрузок остается на ней, замыкая при этом контакты. Дальнейшее движение грузов будет **равномерным**. В этот момент реле блока управления размыкает контакты K_2 и замыкает контакты K_3 . Отсчет **времени равноускоренного движения** t_1 секундомером C_1 прекращается. Одновременно включается секундомер C_2 . Начинается **отсчет времени равномерного движения грузов** t_2 на участке S_2 . При достижении грузом сплошной платформы (5) размыкается контакт K_4 . Отсчет времени t_2 секундомером C_2 прекращается.

Из уравнений кинематики равноускоренного движения (12) и (13) для правого груза в проекции на ось Oy , направленную вниз (при условии, что в начальный момент грузы покоились), получим

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2} \quad (14)$$

$$\vartheta_1 = at_1 \quad (15)$$

Тогда ускорение грузов

$$a = \frac{2S_1}{t_1^2}, \quad (16)$$

а мгновенная скорость в момент снятия перегрузка

$$\vartheta_1 = at_1 = \frac{2S_1}{t_1} \quad (17)$$

Формула (16) справедлива при условии, что движение строго равноускоренное. Для экспериментальной проверки характера движения можно построить график зависимости конечной скорости $\vartheta_1(t)$.

Скорость равномерного движения на участке S_2 в течение времени t_2 находится по формуле:

$$v_2 = \frac{S_2}{t_2} \quad (18)$$

Выполнение работы

Упражнение 1. Определение ускорения и мгновенной скорости равноускоренного движения и скорости равномерного движения.

Включите в сеть блок управления и электронные секундомеры. Тумблер «ЭЛ. МАГ» должен находиться в положении «ВЫКЛ».

На правый груз положите перегрузок массой $m = 4 \text{ г}$. Включив тумблер «ЭЛ. МАГ» (положение «ВЫКЛ») зафиксируйте грузы так, чтобы перегрузок находился у нулевого деления шкалы.

Кольцевую платформу (6) расположите на расстоянии $S_1 = 0,3 \text{ м}$ от начала отсчета. Замкните контакт сплошной платформы (5), подняв ее чашку вверх до упора.

Установите секундомеры на нуль.

Освободите нить, переведя тумблер «ЭЛ.МАГ» в положение «ВЫКЛ». Наблюдайте равноускоренное движение грузов на участке S_1 и равномерное – на участке S_2 . Запишите показания секундомеров t_1 и t_2 . Повторите опыт 3 – 5 раз.

При данном положении кольцевой платформы ($S_1 = 0,3 \text{ м}$ и $S_2 = 0,5 \text{ м}$) запишите показания секундомеров t_1 и t_2 для перегрузка $m = 8 \text{ г}$.

Проделайте аналогичные измерения для $S_1 = 0,4 \text{ м}$ и $S_2 = 0,4 \text{ м}$; $S_1 = 0,5 \text{ м}$ и $S_2 = 0,3 \text{ м}$; $S_1 = 0,6 \text{ м}$ и $S_2 = 0,2 \text{ м}$; $S_1 = 0,7 \text{ м}$ и $S_2 = 0,1 \text{ м}$ (для перегрузков 4 г и 8 г).

Найдите средние значения $\langle t_1 \rangle$ и $\langle t_2 \rangle$ для всех проведенных измерений.

По формулам (16, 17, 18) найдите средние значения ускорения $\langle a \rangle$, конечной скорости $\langle v_1 \rangle$ равноускоренного движения, а также скорости $\langle v_2 \rangle$ равномерного движения.

Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы:

Масса перегрузка, г	Равноускоренное движение					Равномерное движение			
	S_1 , м	t_1 , с	$\langle t_1 \rangle$, с	$\langle v_1 \rangle$, м/с	$\langle a \rangle$, м/с ²	S_2 , м	t_2 , с	$\langle t_2 \rangle$, с	$\langle v_2 \rangle$, м/с
4 г	0,3					0,5			
8 г									

Проанализируйте полученные значения $\langle a \rangle$, $\langle v_1 \rangle$, $\langle v_2 \rangle$. Постройте графики зависимости $\langle v_1 \rangle(t_1)$ для $m = 4 \text{ г}$ и $m = 8 \text{ г}$. Проанализируйте их.

По построенным графикам определите значения $\langle a_1 \rangle$ для $m = 4 \text{ г}$ и $\langle a_2 \rangle$ для $m = 8 \text{ г}$ используя (9) и сравните их с вычисленными.

Контрольные вопросы

1. Что изучает механика?
2. Дайте определение механического движения.
3. Что изучает кинематика, динамика?
4. Дать определение материальной точки, системы отсчета.
5. Что называется траекторией? Как подразделяются движения по виду траектории?
6. Что такое перемещение, путь? При каких движениях путь и численное значение перемещения равны?
7. Дать определение радиуса – вектора, мгновенной и средней скорости, мгновенного и среднего ускорения.
8. Какое движение называется равномерным, равнопеременным?
9. Записать уравнение зависимости скорости движения от времени $\vec{v}(t)$ и радиуса – вектора от времени $\vec{r}(t)$ для равнопеременного движения.
10. Как из графика зависимости $x(t)$ определить $v_{\text{сред}}$, $v_{\text{мгн}}$?

Лабораторная работа № 3

Определение скорости движения воздушного потока в трубке Вентури. Измерение кровяного давления

Приборы и принадлежности: трубка Вентури, пылесос, линейка, штангенциркуль, фонендоскоп, манжета, груша для накачивания воздуха, манометр.

Введение

Раздел физики, в котором изучают движение несжимаемых жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами или поверхностями раздела с другой жидкостью (газом), называют **гидродинамикой**.

Для изучения гидродинамики введем ее основные понятия.

Идеальная жидкость – воображаемая, лишенная вязкости и теплопроводности. **Реальная жидкость** вязкая: в движущейся жидкости всегда возникают силы внутреннего трения (вязкости). **Реальная жидкость** сжимаема: ее объем уменьшается, а плотность увеличивается с повышением давления. Однако сжимаемость жидкости очень мала.

Если скорость жидкости в каждой точке рассматриваемого объема не изменяется с течением времени, то такое течение называется **установившимся (стационарным)**. Графически стационарное течение жидкости можно представить с помощью линий тока. **Линия тока** – линия, в каждой точке которой касательная совпадает с вектором скорости движения частицы жидкости в данный момент времени. При установившемся движении траектории частиц жидкости совпадают с линиями тока. Густота линий тока пропорциональна скорости движения частиц жидкости (см. рис.1). Часть потока жидкости, ограниченная линиями тока, называется **трубкой тока** (см. рис. 2).

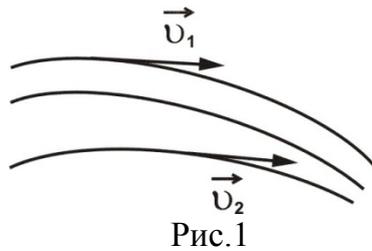


Рис.1

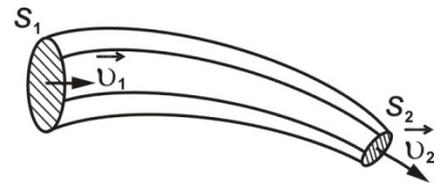


Рис.2

При течении жидкости по трубе (сосуду) трубка тока ограничена стенками трубы (сосуда). Под **струей** понимают часть потока жидкости, которая находится внутри трубки тока.

Если в стационарном потоке идеальной жидкости выбрать произвольную трубку тока сечениями S_1 и S_2 и скоростями течения жидкости в них v_1 и v_2 соответственно (рис. 2), а ее частицы не проникают сквозь стенки трубки тока, то можно считать, что через сечения S_1 и S_2 протекают за один и тот же промежуток времени одинаковые объемы жидкости, равные произведению площади сечения на скорость:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \text{ или } Sv = const \quad (1)$$

Величина $S_1 v_1 = S_2 v_2 = Q$ называется **объемным расходом жидкости** (в $\text{м}^3/\text{с}$). Уравнение (1) называют **условием неразрывности струи или теоремой Эйлера**: *произведение скорости течения жидкости (газа) на площадь поперечного сечения одной и той же трубки тока остается неизменным по всей длине*. Из уравнения (1) следует, что **скорость потока больше в узкой части трубки тока и меньше в широкой части**.

Если в покоящейся жидкости давление зависит только от ее плотности и глубины погружения, то в текущей жидкости оно зависит также от скорости потока.

Используя закон сохранения энергии для установившегося течения идеальной жидкости можно определить зависимость между скоростью стационарного потока идеальной жидкости и давлением. Впервые такое уравнение было получено Бернулли в 1738 году:

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

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2 \quad (2')$$

Слагаемые, входящие в **уравнение Бернулли** (2, 2'), имеют размерность и смысл давления. Давление $\frac{\rho v^2}{2}$ называют **динамическим**, оно обусловлено движением жидкости и проявляется при ее торможении. Динамическое давление представляет собой кинетическую энергию единицы объема жидкости при ее движении.

Давление p называют **статическим**. Оно представляет собой энергию единицы объема жидкости, обусловленную силами давления. Статическое давление не связано с движением жидкости и может быть измерено, например,

манометром, перемещающимся вместе с жидкостью. Статическое давление – давление внутри жидкости.

Давление ρgh – **гидростатическое (весовое)** давление, представляет собой потенциальную энергию единицы объема жидкости в гравитационном поле. В состоянии невесомости гидростатическое давление отсутствует, с увеличением перегрузок оно возрастает.

Сумма $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p$ называется **полным давлением**.

Используя вышеприведенные названия слагаемых, входящих в уравнение (2), его можно сформулировать как **закон Бернулли: в стационарном потоке идеальной жидкости полное давление, равное сумме статического, динамического и гидростатического давлений, постоянно для всех поперечных сечений трубки тока.**

Для **горизонтальной трубки** тока ($h_1 = h_2$) уравнение Бернулли будет иметь вид:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \quad (3)$$

Из уравнения (1) следует, что если площадь сечения $S_1 > S_2$, то $v_1 < v_2$ (рис.2), а значит из (3) имеем, что давление $p_1 > p_2$; и, наоборот, в меньшем сечении, где скорость больше, давление меньше.

Течение **реальной** жидкости по трубе постоянного сечения сопровождается падением статического давления (рис.3). Это явление объясняется наличием у жидкости **внутреннего трения (вязкости)** и сопровождается переходом части ее механической энергии во внутреннюю.

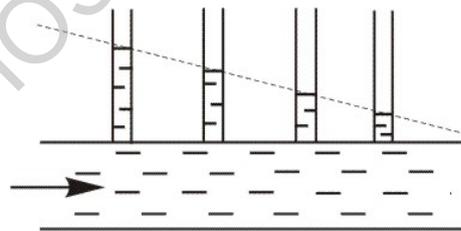


Рис. 3

Течение жидкости называется **ламинарным (слоистым)**, если слои жидкости скользят друг относительно друга, не перемешиваясь. Течение, сопровождающееся образованием вихрей и перемешиванием слоев, называется **турбулентным**. Установившееся (стационарное) течение может быть только ламинарным. Характер течения жидкости по трубе зависит от свойств жидкости, скорости ее течения, размеров трубы и определяется **числом Рейнольдса:**

$$Re = \frac{\rho_{жс} \cdot v \cdot D}{\eta}, \quad (4)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, v – скорость ее течения, D – диаметр трубы, η – коэффициент внутреннего трения или динамической вязкости, зависящий состояния и молекулярных свойств жидкости. Он измеряется в $Па \cdot с$.

Если число Рейнольдса больше некоторого критического ($Re > Re_{крит.}$), то движение турбулентное. Например, для гладких цилиндрических труб $Re_{крит.} = 2300$.

Как видно из (4), характер течения жидкости или газа существенно зависит от размеров трубы. В широких трубах даже при сравнительно небольших скоростях может возникнуть турбулентное движение.

Кровеносная система является совокупностью последовательно и параллельно соединенных трубок – сосудов.

Течение крови по сосудам является, как правило, ламинарным. Однако оно может в некоторых местах стать турбулентным (например, при сильном сужении крупных сосудов, когда $Re > Re_{крит.}$, или при патологическом снижении вязкости крови), что сопровождается характерным шумом. Чем большие участки артерий охвачены турбулентным течением, тем большую работу должно совершать сердце.

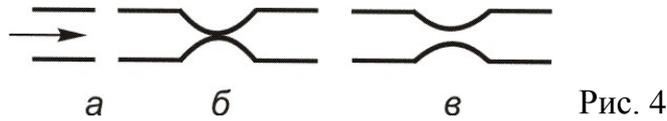
Нормальному кровообращению в организме и экономному расходованию энергии помогает эластичность и упругость кровеносных сосудов.

Физическим параметром, чрезвычайно важным в диагностике многих заболеваний, является **давление крови**.

Непосредственно путем введения в кровеносный сосуд полой иглы, соединений резиновой трубкой с манометром, можно измерить систолическое (максимальное) и диастолическое (минимальное) давления в какой-либо артерии. Систолическое давление устанавливается тогда, когда кровь выталкивается сокращающейся сердечной мышцей из левого вентрикулярного клапана в аорту, а оттуда в артерии. Между сокращениями сердца давление падает до нижнего (диастолического) уровня.

В медицине широко используется метод, предложенный Н.С. Коротковым. Он состоит в следующем. Вокруг руки между плечом и локтем накладывается манжета (плоская резиновая камера в матерчатом чехле). Вначале избыточное над атмосферным давлением воздуха в манжете равно нулю (рис. 4а), манжета не сжимает руку и артерию. По мере накачивания воздуха в манжету, последняя сдавливает плечевую артерию и прекращает ток крови (рис. 4б). Если мускулатура расслаблена, то давление воздуха внутри манжеты, состоящей из эластичных стенок, приблизительно равно давлению в мягких тканях, соприкасающихся с манжетой. Выпуская воздух, уменьшают давление в манжете и в мягких тканях, с которыми она соприкасается. Когда давление станет равным **систолическому**, кровь будет способна пробиваться через сдавленную артерию – возникает турбулентное течение крови (рис. 4в). Характерные тоны и шумы, сопровождающие этот процесс, прослушивает врач при измерении давления, располагая фонендоскоп

на артерии ниже манжеты (т. е. на большом расстоянии от сердца). Продолжая уменьшать давление в манжете, можно восстановить ламинарное течение крови, что заметно по резкому ослаблению прослушиваемых тонов. Давление в манжете, соответствующее восстановлению ламинарного течения артерии, регистрируют как **диастолическое**. Нормальным давлением считается **110/70 мм рт. ст.** или **120/80 мм рт. ст.**



Описание установки и метода

Для выполнения упражнения 1 используется стеклянная горизонтальная трубка переменного сечения (трубка Вентури), закрепленная на подставке (рис. 5).

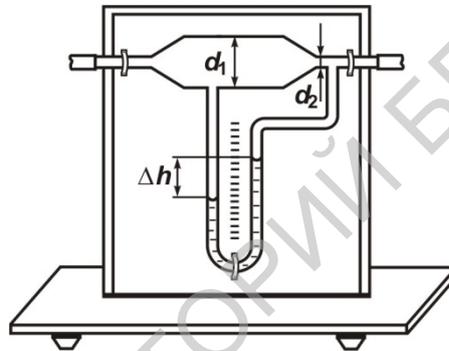


Рис. 5

Резиновая трубка с переходным кольцом соединяет прибор с пылесосом. Разность давлений ΔP , создаваемая струей воздуха в широкой узкой частях трубки, измеряется при помощи U -образного манометра, наполненного водой.

На основании законов движения идеальной жидкости можно определить скорость воздушного потока в трубке переменного сечения. Для горизонтально расположенной трубки уравнение Бернулли имеет вид:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \quad (5)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (6)$$

В соответствии с условием неразрывности струи

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (7)$$

где d_1 и d_2 – диаметры трубки в широкой и узкой частях. Разность давлений в широком и узком сечениях можно определить по разности высот жидкости в манометрических трубках

$$\Delta P = \rho_{жс} g \Delta h \quad (6)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, находящейся в манометре.

Из (6) – (8) получим формулы для определения скорости жидкости в широкой и узкой частях трубки:

$$v_1 = d_2^2 \sqrt{\frac{2\rho_{ж} g \Delta h}{\rho(d_1^4 - d_2^4)}} \quad (9)$$

$$v_2 = d_1^2 \sqrt{\frac{2\rho_{ж} g \Delta h}{\rho(d_1^4 - d_2^4)}} \quad (10)$$

где ρ – плотность воздуха.

Выполнение работы

Упражнение 1. Определение скорости движения воздушного потока в широком и узком сечениях трубки Вентури.

1. При помощи регулировочных винтов установите трубку в горизонтальном положении.

2. Измерьте диаметр широкого (d_1) и узкого (d_2) сечений трубки (с учетом толщины стекла).

3. Включите пылесос и измерьте разность давлений Δh в широком и узком сечениях трубки (разность уровней манометра).

4. Рассчитайте скорости v_1 и v_2 в широкой и узкой частях трубки по формулам (9) и (10) соответственно.

5. Результаты оформите в виде таблицы:

d_1 , м	d_2 , м	Δh , м	v_1 , м/с	v_2 , м/с

6. Проанализируйте полученные результаты.

Упражнении 2. Измерение давления крови.

1. Оберните манжету вокруг плеча (т. е. измерение произведите на плечевой артерии выше локтевого сгиба).

2. Расположите приборы в удобном для наблюдения положении.

3. Прощупайте пульс плечевой артерии несколько выше локтевого сгиба и внутри

от двуглавой мышцы. Приставьте к этому месту фонендоскоп.

4. Закройте выпускной клапан нагнетателя и, ритмически нажимая и отпуская

грушу, нагнетайте воздух в манжету до давления на 10–20 мм рт. ст. выше того, при котором перестает прощупываться пульс на лучевой артерии около лучезапястного сустава.

5. Медленно вращая выпускной винт нагнетателя, постепенно снижайте давление в манжете, внимательно прислушиваясь к звукам, появляющимся в фонендоскопе.

6. Снимите показание манометра при первом появлении тонов. Оно соответствует максимальному или **систолическому** давлению.

7. Заметьте показание манометра в момент резкого ослабления последовательных тонов. Это показание запишите как минимальное или **диастолическое**.

8. Проведите аналогичные измерения еще у двух студентов, у преподавателя.

9. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что изучает гидродинамика?
2. Дать определение идеальной жидкости.
3. Какое течение жидкости называют установившимся (стационарным)?
4. Дать определение линий тока, трубки тока, струи жидкости.
5. Запишите и сформулируйте условие неразрывности струи.
6. Запишите и сформулируйте уравнение Бернулли для идеальной жидкости.
7. Каков физический смысл слагаемых в уравнении Бернулли?
8. Какой вид имеет уравнение Бернулли для горизонтальной трубки тока?
9. Чем отличаются реальные жидкости от идеальных?
10. Дать определение ламинарного и турбулентного течения жидкости.
11. Как определяется число Рейнольдса?
12. Объясните физические основы метода Н. С. Короткова для определения давления крови.
13. Какое давление называют систолическим, какое диастолическим? Как их определить?
14. Что представляет собой трубка Вентури?

Лабораторная работа № 4

Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости

Приборы и принадлежности: звуковой генератор, наушники.

Введение

Колебательным называется такое движение тела или материальной точки, при котором оно поочередно отклоняется то в одну, то в другую сторону от положения устойчивого равновесия. Простейшим видом механического колебательного движения являются гармонические колебания, т. е. периодические колебания, при которых все физические величины (координата,

скорость, ускорение), характеризующие механическое движение, изменяются во времени по закону синуса или косинуса.

Колебания, которые возникают в одном месте упругой среды, передаются соседним частицам за счет взаимодействия с ними и распространяются с некоторой скоростью \vec{v} . Процесс распространения колебаний в среде называется **волновым**.

Линия, которая указывает направление распространения волны называется лучом. Если колебания частиц среды происходят перпендикулярно лучу, то волна называется поперечной. Если же частицы колеблются вдоль луча, то волна называется продольной. В упругой среде возникают и распространяются деформации сдвига (поперечные волны), либо деформации сжатия-растяжения (продольные волны). На рисунке 1 показан «мгновенный снимок» ряда точек в поперечной (а) и продольной (б) волнах.

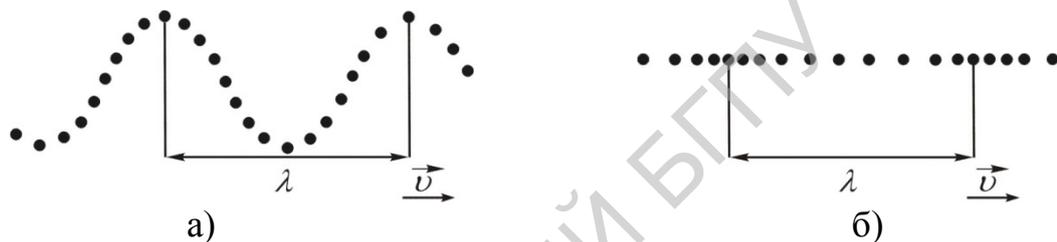


Рис. 1

Волновое возбуждение, распространяясь, захватывает все новые области среды. Геометрическое место точек пространства, до которых дошел волновой процесс к данному моменту времени, называется фронтом волны. Волновая поверхность – это геометрическое место точек, которые колеблются в одинаковой фазе. Волновые поверхности, как и фронт волны, перемещаются со скоростью волны \vec{v} . Волна называется плоской, **если ее волновые поверхности представляют плоскость**, и сферической, если волновые поверхности являются сферами. На рисунке 2 показаны волновые поверхности сферической (а) и плоской (б) волны.

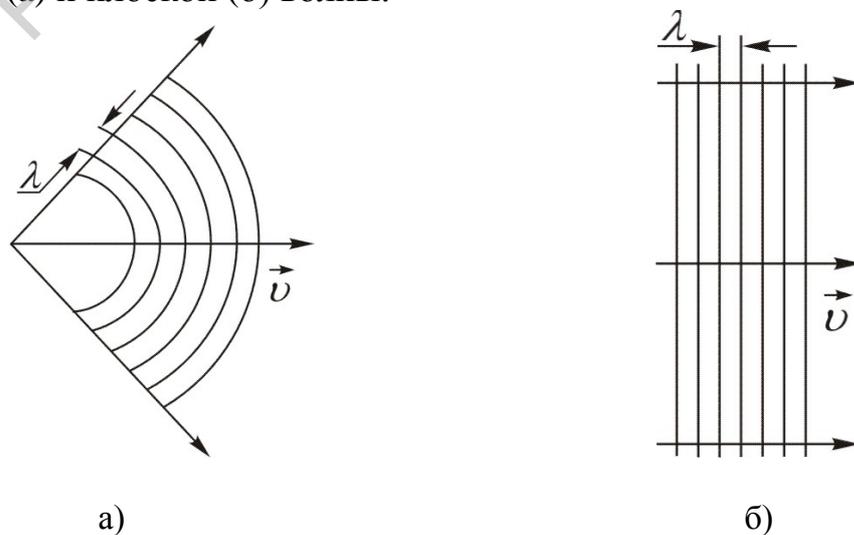


Рис. 2

Длиной волны λ называется расстояние между точками, которые колеблются с разностью фаз 2π . За время, равное периоду колебаний T частиц, фронт волны перемещается в однородной среде на расстояние, равное λ :

$$\lambda = vT \text{ или } \lambda = \frac{v}{\nu} \quad (1)$$

где $\nu = \frac{1}{T}$ – частота колебаний частиц. Колебания с частотой от 16 Гц до 20 кГц, которые распространяются в упругой среде, относятся к звуковым.

В волновом процессе частицы среды не перемещаются, они только колеблются около положения равновесия; со скоростью волны распространяются только колебания, которые переносят энергию. Эта энергия состоит из кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии, обусловленной деформацией среды. Энергия, переносимая волной через некоторую поверхность ΔS в единицу времени, называется потоком энергии через эту поверхность. **Интенсивность** волны – количество энергии ΔW , переносимое волной за единицу времени Δt через единичную площадь поверхности ΔS , перпендикулярную направлению распространения волны:

$$I = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t} \quad (2)$$

Поток энергии выражается в ваттах ($Вт$), а интенсивность – в ваттах на квадратный метр ($Вт/м^2$).

Переменная часть давления, возникающая при прохождении звуковой волны в среде, называется звуковым давлением p . Расчеты дают следующую зависимость между интенсивностью волны I , средним давлением p , плотностью среды ρ и скоростью распространения волны v :

$$I = \frac{p^2}{2\rho v} \quad (3)$$

Минимальное давление, воспринимаемое ухом человека на частоте 1 кГц, равно $2 \cdot 10^{-5} \hat{A} \hat{\delta}$. При давлении $200 \hat{A} \hat{\delta}$ механические колебания среды на этой частоте вызывают в слуховом органе ощущение боли. Поэтому область отношений слухового восприятия человека по давлению составляет $200/10^{-5} \approx 10^7$, а по интенсивности $\sim 10^{14}$, так как интенсивность пропорциональна квадрату звукового давления. Минимальному давлению $2 \cdot 10^{-5} \hat{A} \hat{\delta}$ на частоте 1 кГц соответствует интенсивность звуковой волны, равная $I_0 = 10^{-12} \hat{A} \hat{\delta} / \hat{i}^2$. Это значение интенсивности принимается за порог слышимости. Порогу ощущения боли для этой же частоты соответствует интенсивность, равная $I_{\max} = 10^{-12} \hat{A} \hat{\delta} / \hat{i}^2 \cdot 10^{14} = 10^2 \hat{A} \hat{\delta} / \hat{i}^2$. Как порог слышимости, так и порог ощущения боли зависят от частоты. На рисунке 3 приведена диаграмма слышимости (зависимость чувствительности уха от частоты колебаний).

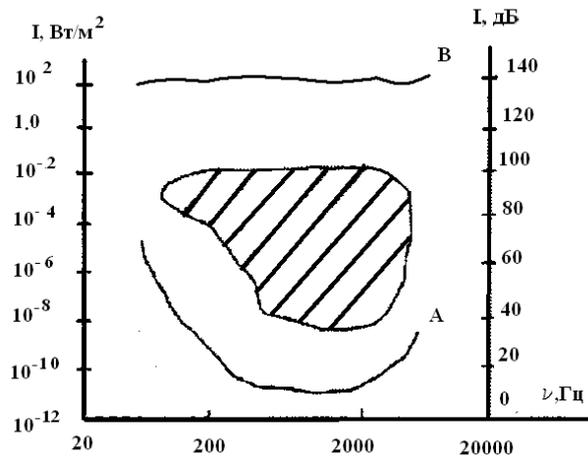


Рис. 3

Область звуков (заштрихованная часть диаграммы), которые воспринимаются ухом человека, располагается между кривыми А и В:

А – порог слышимости, В – порог болевого ощущения.

Интенсивность звуковой волны является ее физической характеристикой. Для оценки интенсивности звука используют логарифмическую шкалу уровней интенсивности. Уровень интенсивности

$$L = k \lg \frac{I}{I_0}, \quad (4)$$

где I – интенсивность звука, I_0 – интенсивность, которая принимается за начальный уровень шкалы.

Уровень интенсивности выражают в беллах (**Б**) при $k = 1$ или децибеллах (**дБ**) при $k = 10$. За 1Б принимают уровень интенсивности звука, интенсивность которого в 10 раз больше чем I_0 .

Физиологической характеристикой слухового ощущения является громкость звука. В основе создания шкалы уровней громкости лежит психофизический закон Вебера-Фехнера, согласно которому при возрастании интенсивности звуковой волны по закону геометрической прогрессии громкость возрастает по закону арифметической прогрессии. Поэтому громкость звука E , как характеристика субъективного восприятия звуковой волны, приблизительно пропорциональна десятичному логарифму ее интенсивности:

$$E = K \lg \frac{I}{I_0}, \quad (5)$$

где I_0 – некоторая стандартная для всех частот начальная интенсивность, которая принимается равной 10^{-12} Вт/м^2 (она соответствует порогу слышимости на частоте 1 кГц), K – коэффициент пропорциональности, который зависит от частоты и интенсивности звука. Громкость измеряется в фонах (фон). Принято считать, что на частоте 1 кГц шкалы громкости и уровня интенсивности совпадают. В этом случае $K = 1$ и 1 фон = 0,1 Б. Громкость на других частотах измеряют путем сравнения исследуемой громкости звука с громкостью звука на частоте 1 кГц.

Для нахождения соотношения между громкостью и интенсивностью звука на разных частотах пользуются **кривыми равной громкости** (рис. 4). Нижняя кривая соответствует интенсивности самых слабых ощущаемых звуков – порогу слышимости. Для всех частот этой кривой $E = 0$, для частоты 1 кГц интенсивность $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$. Верхняя кривая соответствует порогу болевого ощущения.

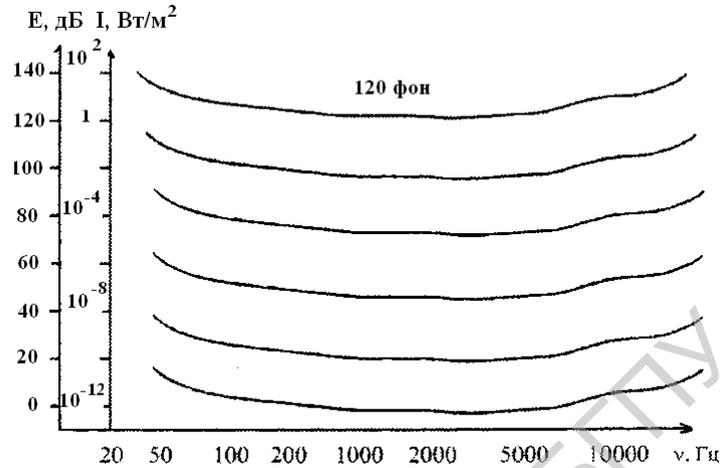


Рис. 4

Изменению интенсивности звуковой волны от I_0 до I_{\max} соответствует изменению громкости от 0 до 140 дБ.

Таблица 1

Примерные значения E и I для некоторых звуков

Источник звука	E , дБ	I , Вт/м ²
Порог слышимости	0	10^{-12}
Тихий шепот	20	10^{-10}
Громкий разговор	70	10^{-5}
Авиадвигатель	120	1
Порог болевого ощущения	130–140	10–100

В электронных приборах, которые используются в лабораторном практикуме, при измерении интенсивности звука, выходная мощность рассчитывается по показаниям вольтметра. Поскольку энергия электрического тока пропорциональна квадрату напряжения при постоянном сопротивлении нагрузки, то отношение интенсивностей генерируемых прибором звуков будет определяться показаниями вольтметра. В этом случае уровни интенсивностей в децибелах можно определить по формуле

$$L = 10 \lg \frac{U^2}{U_0^2} = 20 \lg \frac{U}{U_0} \quad (6)$$

где U и U_0 – показания вольтметра, соответствующие измеряемой интенсивности звука I и интенсивности, принимаемой за начальный уровень шкалы I_0 , а L измеряется в дБ.

Метод измерения остроты слуха называется **аудиометрией**. При аудиометрии на приборе (аудиометре) определяют границу слухового ощущения на разных частотах. Полученная кривая называется спектральной характеристикой уха на пороге слышимости или аудиограммой (рис. 5).

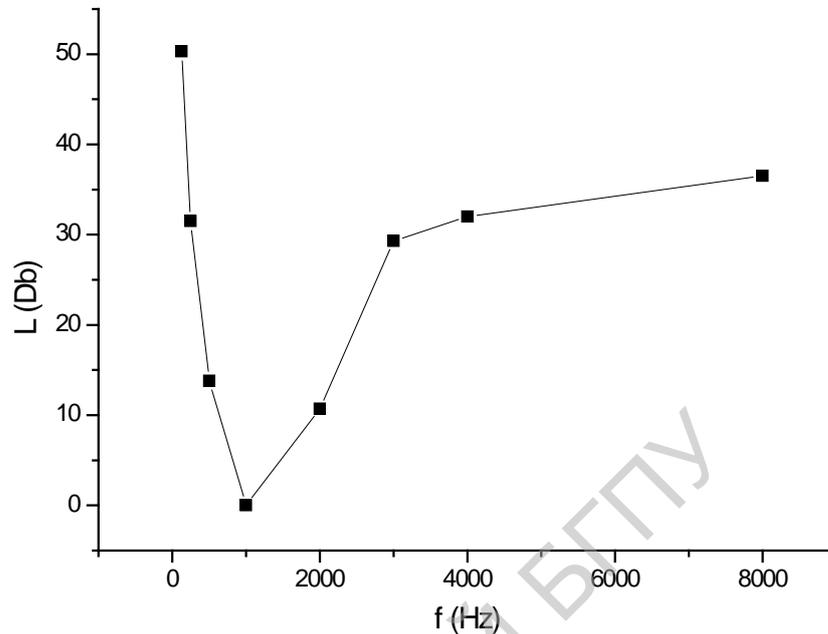


Рис.5. Среднестатистическая аудиограмма для нормального слуха

Выполнение работы

1. Подключите наушники к выходным клеммам 
2. Включите генератор и дайте ему прогреться 3-5 минут.
3. Шкалу прибора поставьте в положение 30V 
4. Внутреннюю нагрузку поставьте в положение «Вкл.» 

Один из наушников приложите к правому уху. Пользуясь ручкой «Установка частоты», установите частоту 125 Гц и с помощью регулятора

выхода , вращая ручку против часовой стрелки, по шкале  с

учетом диапазона  зафиксируйте значение напряжения U_1 в милливольтгах, при котором начинает слышаться звук. Измерения произведите 3 раза.

5. Не изменяя частоту, регулятором выхода увеличьте пороговое значение напряжения U_1 в два раза. Затем, уменьшая напряжение, зафиксируйте

минимальный уровень U_2 , при котором звук еще слышен. Измерение произведите 3 раза.

6. Вычислите среднее значения порогового уровня напряжения $\langle U \rangle$ для данной частоты.

7. Таким же образом определите $\langle U \rangle$ для частот 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

8. По формуле (6) для средних значений напряжений определите соответствующие уровни интенсивности $\langle L \rangle$. В качестве $\langle U_0 \rangle$ возьмите среднее значение $\langle U \rangle$ на частоте 1кГц.

9. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

ν , Гц	U_1 , mV	U_2 , mV	$\langle U \rangle$, mV	$\langle L \rangle$, дБ
125	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		
250	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		
500	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		
1000	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		
2000	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		
4000	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		
8000	1.	1.		
	2.	2.		
	3.	3.		

Пункты 5–10 повторите для левого уха.

По полученным данным постройте аудиограммы $L(\nu)$ для правого и левого уха.

Сравните полученные аудиограммы со среднестатистической аудиограммой для нормального слуха (рис.5) и охарактеризуйте возможности вашего слухового ощущения на разных частотах.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой колебательное движение?

2. Какие колебания называются гармоническими?
3. Дайте определение луча, фронта, волновой поверхности.
4. Какая волна называется поперечной, какая продольной? Где распространяются поперечные волны, а где продольные?
5. Дайте определение длины волны, периода колебаний T частоты колебаний.
6. Какие колебания относятся к звуковым? Каковы физические характеристики звука?
7. Перечислите характеристики слухового ощущения. Как они связаны с физическими характеристиками звука?
8. Назовите единицы уровня интенсивности и громкости звука?
9. Что представляют собой кривые равной громкости?

Лабораторная работа № 5

Определение модуля упругости костной ткани

Приборы и принадлежности: индикатор малых перемещений, штангенциркуль, миллиметровая линейка длиной 30 см, набор прямоугольных пластин из органического стекла, пластинка костной ткани, алюминиевая и стеклянная трубки длиной 30 см, грузы.

Введение

Деформациями называют изменения формы и объема тел под действием различных сил. Они могут быть вызваны внешним воздействием или внутренними силами.

В твердых телах частицы при деформации смещаются в новые положения. Этим смещениям препятствуют силы взаимодействия между частицами, поэтому в деформированном теле возникают внутренние упругие силы, которые уравнивают внешние силы, приложенные к телу. В зависимости от действующих сил различают следующие деформации: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб. Во всех твердых телах наблюдается два вида деформации: **упругая**, когда после прекращения действия силы деформация полностью исчезает, и **пластическая**, когда после прекращения действия силы деформация полностью не исчезает. Деформация сохраняет упругий характер только при малых нагрузках до предельного ее значения, называемого **пределом упругости**, после чего она переходит в пластическую.

Среди деформаций, возникающих в твердых телах, различают пять основных: Растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб.

Деформацию сжатия и растяжения осуществляют, приложив внешнюю силу перпендикулярно поперечному сечению тела.

Для получения деформации сдвига прикладывают касательную (тангенциальную) силу, параллельную слоям тела, удерживая при этом нижний неподвижный слой.

Деформацию кручения можно наблюдать, приложив к верхней части тела пару сил, сохраняя неподвижной нижнюю часть тела.

Деформация изгиба осуществляется, если внешнюю силу приложить перпендикулярно оси тела. Тогда внутренний слой тела сожмется, а внешний растянется. В середине тела существует слой, не подвергающийся ни растяжению, ни сжатию. Его называют **нейтральным слоем**.

Трубчатое строение имеют кости конечностей, стебли быстрорастущих растений – злаков, зонтичных и т.д. Молодые, неокрепшие листья злаков всегда свертываются в трубочку. При этом прочность сохраняется, а конструкция облегчена.

Человеческое тело испытывает достаточно большую механическую нагрузку от собственного веса и от мышечных усилий, возникающих во время трудовой деятельности. Причем, на примере тела человека можно проследить все виды деформации.

Так, деформации **растяжения** испытывают верхние конечности, связки, сухожилия, мышцы; деформации **сжатия** – позвоночный столб, нижние конечности и покровы ступни; **кручения** – шея при повороте головы, туловище в пояснице при повороте, кисти рук при вращении; **изгиба** – позвоночник, кости таза, конечности, и т.д.

Между упругими свойствами кристаллических тел и полимерных материалов существует принципиальная разница, например, сталь разрывается при растяжении на 0,3 %, а мягкая резина может растягиваться до 300 %. Это связано с качественно иным механизмом упругости высокомолекулярных соединений.

При деформации твердых тел силы упругости определяются изменением межатомных расстояний. Структура же высокомолекулярных соединений не регулярна. Они построены из очень длинных гибких молекул, которые по-разному изогнуты, части молекул находятся в хаотическом тепловом движении, так что их форма и длина все время изменяются. Однако в каждый момент большинство молекул в недеформированном теле имеют длину, близкую к наиболее вероятной. Если приложить нагрузку к материалу, его молекулы выпрямляются в соответствующем направлении и длина тела увеличивается (рис. 1).

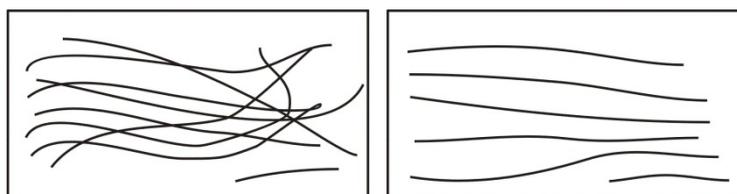


Рис. 1

После снятия нагрузки, в результате хаотического теплового движения длина каждой молекулы стремится к первоначальной и тело сокращает свои размеры.

Исследуя упругие деформации тел, английский физик Гук установил следующий закон: изменение длины тела Δl прямо пропорционально приложенной к нему силе F , его первоначальной длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot S}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, или **модуль Юнга**. Уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} \quad \text{или} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Отношение $\frac{F}{S} = \sigma$ – называется **напряжением**, $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$ – **относительным**

изменением длины. При $\Delta l = l$ получаем $E = \frac{F}{S}$, т. е. **модуль Юнга** – это напряжение, при котором длина тела удваивается ($l + \Delta l = 2l$). Фактическое удвоение длины можно получить у резины и некоторых полимерных материалов. Для других материалов разрушение тела происходит раньше, чем его длина удвоится. Упругие константы в определенных условиях удобнее определять не по деформации растяжения, а по изгибу тела. В деформации изгиба сжатие в одной части тела комбинируется с растяжением в другой его части. В отличие от продольных напряжений растянутых (или сжатых) тел напряжения при изгибе будут поперечными, т. е. перпендикулярными к их длине. Мерой деформации в этом случае является **стрела прогиба**.

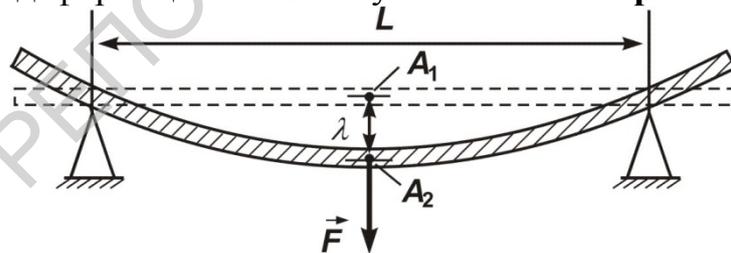


Рис. 2

Расстояние λ между осью недеформированного стержня и осью деформированного стержня (расстояние $A_1 A_2$) и есть стрелая прогиба (рис. 2).

Величиной, характеризующей прочность материала, является наименьшее напряжение, вызывающее разрушение данного образца.

Изучение прочности и упругих свойств тканей организма имеет большой практический интерес. Биологу, хирургу необходимо знать прочность биологических тканей. Методы определения прочности этих тканей аналогичны методам определения прочности обычных материалов. Отрасль науки, изучающая устойчивость биологических тканей к механическим воздействиям, называется **биоспромом**.

Строение костной ткани сложное. В состав ткани входит органический материал, главным образом коллаген, и неорганическое соединение, которое содержит кальций, фосфор и др. Коллаген в кости образует фибриллы – тонкие, длинные нити. Кристаллы неорганических веществ расположены между фибриллами и прочно прикреплены к ним. Такая сложная структура определяет механические свойства костной ткани – **упругость и пластичность**. Модуль упругости костной ткани имеет промежуточное значение между модулями упругости ее компонент и зависит от их процентного содержания.

При исследованиях упругих свойств костной ткани считают, что кость имеет сплошное строение, потому что размер структурных элементов намного меньше, чем сама кость. Кость считается однородной и изотропной. Она обладает одинаковыми механическими свойствами во всех точках и по всем направлениям.

Знание упругих характеристик костей необходимы в хирургической практике (подбор нагрузок при вытяжке). Прочность кости – показатель, без которого не может обойтись судебно-медицинская экспертиза. Для диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы используется определение модуля упругости стенок кровеносных сосудов. Знакомство с элементами учения о сопротивлении материалов представляет особый интерес для стоматологов, так как зубной протез – это конструкция, прочность и надежность которой обеспечивается учетом законов деформации.

Приспособления для определения модуля упругости по деформации изгиба представлены на рисунке 3. Образец свободно укладывается на две призмы А и В, которыми оканчиваются опоры (рис. 3 а) или закрепляется консольно за один из концов (рис. 3 б).

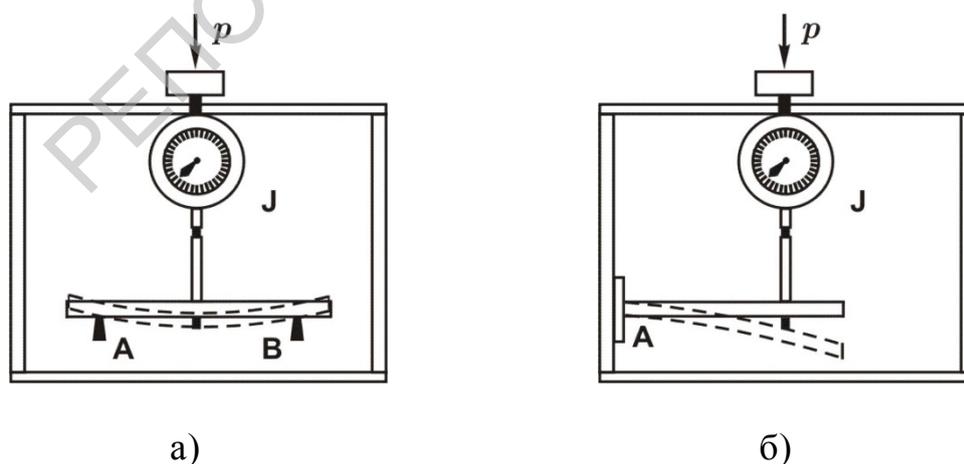


Рис. 3

На середину образца или на его свободный конец действуют нагрузкой p . Прогиб образца измеряется с помощью индикатора малых перемещений J . Для модуля упругости образца в виде пластины (пластинка кости, органического стекла) теория дает следующие выражения: для случая (рис. 3 а)

$$E = \frac{p \cdot l^3}{4fb \cdot h^3} \quad (2)$$

для случая (рис. 3 б)

$$E = \frac{4p \cdot l^3}{fb \cdot h^3} \quad (3)$$

где $p = mg$ – нагрузка, l – расстояние между опорами, или от места закрепления образца до точки действия нагрузки, f – стрела прогиба (расстояние между осью недеформированного и осью деформированного образца), b – ширина образца, h – толщина, m – масса груза, g – ускорение свободного падения. Для тел в виде трубок (случай рис. 3 а)

$$E = \frac{p \cdot l^3}{12\pi f (D^4 - d^4)} \quad (4)$$

где D – внешний, d – внутренний диаметр трубки. Длину образца измеряют миллиметровой линейкой, линейные размеры – штангенциркулем. Измерения делают в нескольких местах вдоль образца и берут их среднее значение. Все размеры выражают в метрах, нагрузку p – в ньютонах.

Выполнение работы

Штангенциркулем и линейкой измерьте ширину b , толщину h и длину l образца костной ткани. Измерения выполните три раза и определите среднее значение $\langle b \rangle, \langle h \rangle, \langle l \rangle$.

Результаты измерений занесите в таблицу:

№ обр.	$b_1, м$	$b_2, м$	$b_3, м$	$\langle b \rangle, м$	$h_1, м$	$h_2, м$	$h_3, м$	$\langle h \rangle, м$	$l_1, м$	$l_2, м$	$l_3, м$	$\langle l \rangle, м$
.												

Положите образец на призмы опор А и В (рис. 2 а) или закрепите его в точке А (рис. 2 б).

Последовательно нагружая образец ткани разными грузами m , выполните соответствующие измерения стрелы прогиба $f = n - n_0$, где n и n_0 – конечное и начальное показания индикатора I соответственно.

По формулам (2) или (3) выполните вычисления модуля упругости образца E для каждой нагрузки и вычислите среднее значение $\langle E \rangle$.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

№ образца	$m, кг$	$f, м$	$E, Па$	$\langle E \rangle, Па$

Выполните подобные измерения и вычисления для разных образцов, предложенных преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Что называют деформациями?
2. Чем отличаются силы, возникающие внутри тела, при упругих и пластических деформациях?
3. Какие различаются деформации в зависимости от действующих сил?
4. Какова принципиальная разница между упругими свойствами кристаллических и полимерных материалов?
5. Как формулируется закон Гука? Физический смысл модуля Юнга.
6. Охарактеризуйте деформацию изгиба. Как называется величина, являющаяся мерой деформации изгиба?
7. Каково строение костной ткани организма, чем определяется ее упругость и пластичность?
8. Как на практике используются свойства деформации изгиба?

Лабораторная работа № 6

Определение вязкости газов

Приборы и принадлежности: газометр, капилляр, осушитель, U – образный манометр, мензурка, секундомер.

Введение

Постепенное распространение в газе молекул примеси от места их ввода в газ без внешнего воздействия представляет собой пример явления **диффузии**. Процесс переноса энергии от более нагретых к более холодным слоям газа называется **теплопроводностью**. **Внутреннее трение** – это свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Для замкнутых систем явления диффузии, теплопроводности и внутреннего трения очень похожи. Все они соответственно приводят к выравниванию концентраций, температур и скоростей в веществе (выравнивание скоростей, конечно, имеет место только для жидких и газообразных тел). В основе этих трех явлений лежит один и тот же молекулярный механизм – хаотическое движение и перемешивание молекул. Быстрота перемешивания определяется частотой столкновений между молекулами, т. е. зависит от их **длины свободного пробега** λ (путь, проходимый молекулой от одного столкновения до следующего). Поскольку молекулярный механизм один и тот же, то можно ожидать, что все названные явления переноса будут описываться похожими закономерностями, а количественные характеристики будут тесно связаны друг с другом.

Рассмотрим два бесконечно малых объема вещества, находящихся на расстоянии dx друг от друга.

Если эти два малых объема вещества содержат различное число молекул примеси n_1 и n_2 , то будет происходить выравнивание концентрации примеси в пространстве согласно закону диффузии (закону Фика). **Закон Фика** утверждает, что поток молекул примеси, диффундирующих через единицу площади за единицу времени, пропорционален градиенту концентрации dn/dx (градиент определяется как производная от функции по направлению в пространстве):

$$j = -D \frac{dn}{dx} \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности D называется **коэффициентом диффузии**. Знак « $-$ » показывает, что поток молекул примеси направлен в сторону уменьшения концентрации примеси.

Если эти объемы имеют различные абсолютные температуры T_1 и T_2 , то происходит выравнивание температур за счет градиента температур dT/dx согласно **закону теплопроводности (закону Фурье)**.

$$q = -\chi \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

где χ – **коэффициент теплопроводности**.

Если эти объемы имеют различные скорости, то один из них замедляется или ускоряется вторым, вследствие возникшего градиента скорости $d\vartheta/dx$, характеризующего быстроту изменения скорости от слоя к слою. Между слоями жидкости или газа действуют силы внутреннего трения. По **закону вязкого трения** сила внутреннего трения при движении слоев в жидкости или газе прямо пропорциональна градиенту скорости $d\vartheta/dx$, т. е.

$$f_{mp} = -\eta \frac{d\vartheta}{dx} \quad (3)$$

где η – **коэффициент динамической вязкости** или **коэффициент внутреннего трения**. Знак « $-$ » показывает, что сила трения направлена в сторону, противоположную направлению движения.

Все эти законы были получены из анализа экспериментальных данных. Единицы измерения: коэффициента диффузии является $\text{м}^2/\text{с}$, коэффициента теплопроводности – $\frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$, а коэффициента вязкости – $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Коэффициент динамической вязкости жидкости или газа (коэффициент внутреннего трения) численно равен тангенциальной составляющей силы, действующей на единицу площади, необходимой для поддержания разности скоростей, равной единице, между двумя параллельными слоями жидкости или газа, расстояние между которыми равно единице.

$$\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \rho \langle \vartheta_m \rangle \quad (4)$$

где $\langle \vartheta_m \rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул газа (жидкости); $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина пробега молекулы; ρ – плотность газа (жидкости).

Коэффициент диффузии численно равен потоку молекул через единицу площади за единицу времени при градиенте концентрации, равном единице.

$$D = \frac{1}{3} \langle \vartheta_m \rangle \langle \lambda \rangle \quad (5)$$

Аналогичные рассуждения применимы и для тепловых потоков. **Тепловой поток** – это количество теплоты, передаваемое через изотермическую поверхность в единицу времени (изотермическая поверхность – это поверхность, в каждой точке которой температура одинакова). Тепловой поток измеряется в ваттах. Механизм переноса тепла состоит в следующем. Молекулы в разных слоях газа обладают не одинаковыми средними кинетическими энергиями, что обусловлено различными температурами слоев. Движение молекул приводит к перемешиванию молекул, имеющих различные средние кинетические энергии $\varepsilon = \frac{3}{2} kT$ (k – постоянная Больцмана), а с макроскопической точки зрения это приводит к возникновению потока тепла.

Коэффициент теплопроводности χ численно равен количеству тепла, проходящему через единицу площади за единицу времени при градиенте температур, равном единице.

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \langle \vartheta_m \rangle \langle \lambda \rangle c_{y\delta} \quad (6)$$

где $c_{y\delta}$ – удельная теплоемкость; ρ – плотность газа (жидкости).

Для воздуха значение $c_{y\delta}$ можно взять из таблиц или вычислить по формуле $c_{y\delta} = \frac{iR}{2\mu}$, где i – число степеней свободы молекулы газа, т.е. число независимых переменных, которые определяют положение молекулы в пространстве. Для двухатомной молекулы $i = 5$: три степени свободы связаны с поступательным движением и две – с вращательным.

Рассматривая формулы (4), (5) и (6), можно увидеть взаимосвязь между коэффициентами χ , D и η : зная $\langle \vartheta_m \rangle$ и $\langle \lambda \rangle$ можно вычислить все три коэффициента для воздуха. Однако в данном случае мы поступаем иначе – исходя из полученных в опыте данных, определяем коэффициент вязкости η , а затем вычисляем среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекулы воздуха, коэффициенты теплопроводности χ и диффузии D , эффективный диаметр молекулы воздуха d .

Итак, наша первая цель – определить коэффициент вязкости воздуха η . Установившееся ламинарное течение жидкостей по круглым трубам подчиняется закону Пуазейля, из которого следует, что объем жидкости V , прошедший за время t через трубу длиной l можно определить по формуле

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 \eta l} \quad (7)$$

где r – радиус трубы; Δp – разность давлений на концах трубы.

Это же выражение будет справедливо и в случае установившегося ламинарного изотермического течения газа по капилляру при незначительной разности давлений на его концах. Из (7) мы можем определить коэффициент вязкости газа η :

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8Vl} \quad (8)$$

где r – радиус капилляра; $\Delta p = p_1 - p_2$ – разность давлений на концах капилляра (обычно давление p_1 на входе в капилляр равно атмосферному давлению, а на выходе давление p_2 меньше, но незначительно отличается от атмосферного); l – длина капилляра; t – время, за которое протекает через капилляр объем газа V

Исходя из молекулярно-кинетической теории газов определяется средняя арифметическая скорость движения молекул:

$$\langle \vartheta_m \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (9)$$

где μ – молярная масса (для воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$); R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,314 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$); T – абсолютная температура газа, измеряемая в кельвинах ($T = 273 + t^0$).

Используя уравнение Клапейрона-Менделеева $pV = \frac{m}{\mu}RT$, для идеального газа и учитывая, что плотность $\rho = \frac{m}{V}$ получаем для плотности газа соотношение $\rho = \frac{p\mu}{RT}$. Подставляя полученные значения плотности газа ρ и скорости молекул $\langle \vartheta_m \rangle$ в формулу (4) и зная коэффициент вязкости η , можно рассчитать **среднюю длину свободного пробега** $\langle \lambda \rangle$:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}} \quad (10)$$

где p – нормальное давление ($p = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

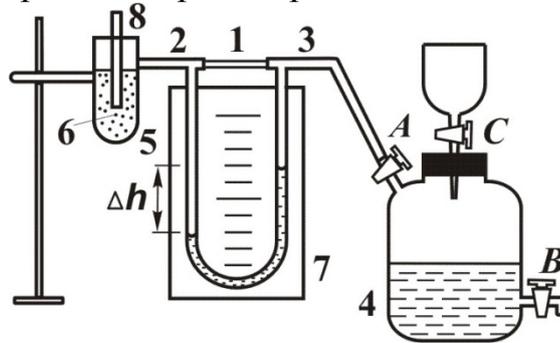
Найдем **эффективный диаметр молекулы** воздуха d (минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры молекул при соударении). Молекулярно-кинетическая теория дает формулу для определения эффективного диаметра молекулы воздуха в виде:

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\langle \lambda \rangle p}} \quad (11)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$).

Описание установки и метода

На рис. 1 схематично приведена установка, необходимая для проведения опыта. Капилляр *1* при помощи трубок *2* и *3* соединен с газометром *4* и осушительной пробиркой *5*, заполненной поглотителем *6* паров воды из воздуха (например, CaCl_2). К трубкам *2* и *3* присоединен U-образный манометр *7*, при помощи которого измеряется разность давлений на концах капилляра.



Если из газометра при открытом кране *B* и закрытом кране *C* выливается вода, то давление в нем над поверхностью жидкости уменьшается, и в капилляре *1* возникает поток воздуха. Вследствие существования внутреннего трения, давление на концах капилляра будет разным. Разность этих давлений $\Delta p = \rho_{ж} g \Delta h$, где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, которой заполнен манометр, Δh – разность уровней жидкости в манометре *7*, g – ускорение свободного падения ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$).

Выполнение работы

Закройте кран *B* (рис. 1) газометра.

Откройте кран *C* воронки газометра, наполните газометр водой до $2/3$ его объема, после чего кран *C* закройте.

Откройте кран *B* газометра. Вода, вытекая из газометра, создает над своей поверхностью разреженное пространство. Это пространство соединено тройниками *3* и *2* с манометром *7*, капилляром *1*, осушительной пробиркой *5*, а через нее с атмосферным воздухом. Следовательно, поскольку над поверхностью воды в газометре возникает давление ниже атмосферного, то воздух из атмосферы через капилляр будет засасываться в газометр. Объем воздуха V , протекшего через капилляр, равен объему воды, вытекшей из газометра. С помощью мензурки измерьте объем вытекшей воды за время t , отсчитанное по секундомеру.

Во время вытекания жидкости из газометра измерьте разность уровней жидкости Δh в манометре *7* и закройте кран *B* газометра (рис. 1).

Зная плотность жидкости $\rho_{ж}$ в манометре, вычислите разность давлений $\Delta p = \rho_{ж} g \Delta h$ на концах капилляра. Для условий ламинарного течения воздуха высота Δh не должна превышать 1–2 см, если в манометре вода.

По формулам (8), (9), (10), (11), (5), (6) вычислите $\eta, \langle \vartheta_m \rangle, \langle \lambda \rangle, d, D, \chi$ для воздуха.

Данные вычислений и измерений запишите в таблицу:

t, c	V, m^3	$\Delta h, m$	$\Delta p, Pa$	$\eta, Pa \cdot c$	$\langle \vartheta_m \rangle, m/c$	$\langle \lambda \rangle, m$	d, m	$D, m^2/c$	$\chi, \frac{Дж}{m \cdot c \cdot K}$

Проанализируйте рассчитанные величины для воздуха.

Контрольные вопросы

1. Какие явления переноса вы знаете? Дайте определение каждого из этих явлений. Сформулируйте законы диффузии, теплопроводности и вязкого трения.
2. Какова причина вязкости, диффузии, теплопроводности газов?
3. Что называется коэффициентом динамической вязкости? От чего и как он зависит?
4. Дайте определение коэффициента диффузии, коэффициента теплопроводности.
5. Запишите формулу Пуазейля и объясните возможность ее использования для определения вязкости газов.
6. Назовите единицы измерения $\eta, \langle \lambda \rangle, \langle \vartheta \rangle, D, d, \chi$.
7. Запишите связь между η и $\langle \lambda \rangle$; $\langle \lambda \rangle$ и d ; D и $\langle \lambda \rangle$; χ и $\langle \lambda \rangle$.
8. Что представляет собой U-образный манометр и что он измеряет?
9. Какому закону подчиняется ламинарное установившееся течение жидкостей (газов) по трубкам?

Лабораторная работа № 7

Определение отношения теплоемкостей газа ($\gamma = C_p / C_v$) методом Клемана – Дезорма

Приборы и принадлежности: насос или резиновая груша, баллон объемом 20 – 30 л с краном, U-образный манометр.

Введение

Тепловое состояние системы (газа) определяется интенсивностью хаотического (теплового) движения его молекул.

Для характеристики теплового состояния любого вещества вводится понятие **температуры T** как физической величины. Чем интенсивнее тепловое движение молекул или атомов в системе, тем выше его температура. Если при контакте тепловые состояния систем не изменяются, то их температуры

одинаковы и системы находятся в тепловом равновесии, т.е. теплообмен между ними не происходит. Количество энергии, поглощаемое или отдаваемой системой (телом, веществом) при теплообмене называется **количеством теплоты Q** . **Количество теплоты** является мерой изменения **внутренней энергии U системы**, поэтому измеряют его, как и энергию в джоулях.

Опыт показывает, что количество теплоты Q поглощаемое газом при нагревании его на 1 К, пропорционально коэффициенту c , который называется теплоемкостью, т.е. $Q = c(T_2 - T_1)$.

Различают **удельную теплоемкость** – это количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества на 1 К и **молярную теплоемкость** – это количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля вещества на 1 К. Единицами удельной теплоемкости является $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$, молярной $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right]$. В дальнейшем будем использовать молярную теплоемкость, обозначая ее большой буквой C . **Связь** молярной и удельной теплоемкости: $C = c \cdot \mu$, где μ – молярная масса вещества.

Теплоемкость газа зависит от того, при каких условиях он нагревается: при постоянном объеме (**изохорный процесс**) или при постоянном давлении (**изобарный процесс**). Поэтому для газа будем различать **молярную теплоемкость при постоянном объеме C_V** и **молярную теплоемкость при постоянном давлении C_p** .

Ответ на вопрос, как расходуется количество теплоты Q , получаемое системой (газом), дает **первое начало термодинамики**. Его формулировка: при бесконечно малом изменении состояния системы, бесконечно малое количество теплоты δQ , сообщаемое системе (газу), идет на изменение **внутренней энергии системы dU** и на совершение системой работы δA против действия внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (1)$$

Работа δA при увеличении объема системы (газа) на dV при давлении p будет определяться по формуле $\delta A = p dV$ и первое начало термодинамики можно записать в виде:

$$\delta Q = dU + p dV \quad (2)$$

Исходя из первого начала термодинамики, молярную теплоемкость газа C_V при изохорном процессе (т.е. изменение объема $dV = 0$) можно вычислять, разделив (2) на dT :

$$C_V = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT} \quad (3)$$

Молярную теплоемкость газа C_p при изобарном процессе получим аналогичным образом:

$$C_p = \frac{dU + pdV}{dT} = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} = C_v + p \frac{dV}{dT} \quad (4)$$

Следовательно, $C_p > C_v$ на величину $p \frac{dV}{dT}$.

Чтобы определить слагаемое $p \frac{dV}{dT}$, запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для одного моля идеального газа:

$$pV = RT \quad (5)$$

где p – давление газа, V – молярный объем, $R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная.

Если $p = \text{const}$ (процесс изобарный), то $pdV = RdT$. Следовательно, $p \frac{dV}{dT} = R$ и уравнение (4) можем переписать в виде:

$$C_p = C_v + R \quad (6)$$

Эта связь молярных теплоемкостей называется **уравнением Майера**.

Процессы, происходящие без теплообмена с окружающей средой, называются **адиабатическими**. Например, при адиабатическом сжатии газа, он не успевает отдать свое тепло и сильно нагревается. Этот процесс используется для воспламенения смеси в двигателях внутреннего сгорания. Охлаждение при адиабатическом расширении является одним из способов получения низких температур и сжижения газов.

При адиабатическом процессе, когда нет теплообмена с окружающей средой, т.е. $\delta Q = 0$, первое начало термодинамики (2) примет вид:

$$dU + pdV = 0 \quad (7)$$

Интегрирование уравнения (7) приводит к уравнению Пуассона, являющегося **уравнением адиабатического процесса**:

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (8)$$

где γ – отношение молярной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении к молярной теплоемкости при постоянном объеме, называемое **показателем адиабаты**, т.е.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (9)$$

Для того чтобы найти молярные теплоемкости C_v и C_p , необходимо знать внутреннюю энергию одного моля газа. **Идеальный газ** – это совокупность молекул не взаимодействующих друг с другом и следовательно, не обладающих потенциальной энергией. Внутренняя энергия идеального газа складывается только из кинетической энергии его молекул. Такие молекулы к тому же не деформируются, т.е. имеют постоянную форму и очень малый размер. Размером одноатомной молекулы вообще пренебрегают, считая ее материальной точкой (рис. 1 а), способной двигаться поступательно в трех

независимых направлениях, т.е. имеющей 3 степени свободы ($i=3$). Если многоатомная молекула произвольно перемещается в пространстве, то она в отличие от одноатомной молекулы будет обладать шестью степенями свободы ($i=6$): кроме поступательного движения ($i=3$) она может вращаться вокруг соответствующих осей, что дает ей еще три степени свободы (рис. 1 в). Двухатомная молекула (рис. 1 б) имеет 5 степеней свободы – три характеризуют поступательное движение и две вращательное движение (вращение двухатомной молекулы вдоль оси u можно не учитывать, т.к. кинетическая энергия молекулы, связанная с этим вращением, очень мала)



Рис. 1

Воздух является смесью многих газов – двухатомные N_2, O_2, \dots , трехатомные H_2O, CO_2 и т.д. Так как доля многоатомных и одноатомных газов в нем мала, то его можно рассмотреть как двухатомный газ.

Средняя кинетическая энергия $\langle E \rangle$ движения молекулы с i степенями свободы, рассчитанная методами статистической физики, будет равна

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$), T – абсолютная температура.

Внутренняя энергия U одного моля газа, содержащего N_A молекул, определяется по формуле:

$$U = \langle E \rangle \cdot N_A = \frac{i}{2} kT \cdot N_A = \frac{i}{2} RT,$$

где N_A – число Авогадро ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$), $R = k \cdot N_A$ – универсальная газовая постоянная.

Следовательно, исходя из уравнения (3) и (6), получим молярные теплоемкости:

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R \quad (10)$$

$$C_p = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R \quad (11)$$

Показатель адиабаты γ в уравнении (9) будет равен

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} \quad (12)$$

Значение γ зависит от числа степеней свободы i молекулы, т.е. от ее строения.

Описание метода и установки

Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона А, соединенного с манометром В и насосом Е. Посредством крана С баллон может быть соединен с атмосферой. Если при помощи насоса Е накачать в баллон некоторое количество воздуха, то давление и температура воздуха внутри баллона повысятся. Вследствие теплообмена воздуха с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в баллоне, сравняется с температурой внешней среды T_1 . Давление, установившееся в баллоне $p_1 = p_0 + \rho gh_1$, где p_0 – атмосферное давление, h_1 – разность уровней жидкости в трубках манометра (ρgh_1 – гидростатическое давление, созданное при накачке воздуха в баллон), ρ – плотность жидкости в манометре.

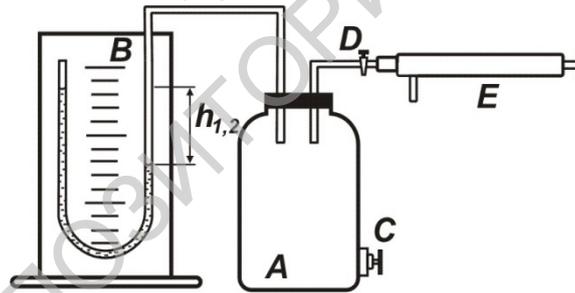


Рис. 2

Таким образом, состояние воздуха внутри баллона, которое назовем 1 состоянием (точка 1, рис. 3), характеризуется параметрами V_1 , T_1 и $p_1 = p_0 + \rho gh_1$, где V_1 – объем газа. Если открыть на короткое время кран С, то воздух выходя из баллона будет расширяться, теплообмен не успевает произойти и этот процесс можно считать адиабатическим.

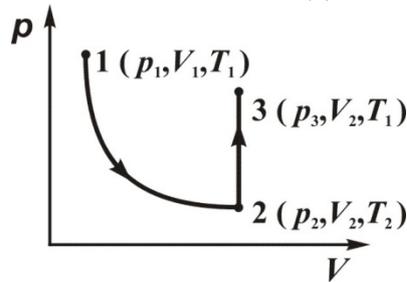


Рис. 3

Давление в баллоне устанавливается равным атмосферному p_0 , температура газа понизится до T_2 , а объем будет равен V_2 . Следовательно, в

конце адиабатического процесса в состоянии 2 (точка 2, рис. 3) параметры газа будут V_2 , T_2 и $p_2 = p_0$. Применяя к 1 и 2 состоянию уравнение Пуассона, получим $p_1 \cdot V_1^\gamma = p_0 \cdot V_2^\gamma$, что дает

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \frac{p_1}{p_0} \quad (13)$$

Охладившийся при расширении воздух в баллоне через некоторое время вследствие теплообмена начинает изохорически нагреваться до температуры внешней среды T_1 . Давление возрастает до некоторой величины $p_3 = p_0 + \rho gh_2$, где h_2 – новая разность уровней в манометре, объем воздуха не изменится и будет равен V_2 . Таким образом, новое состояние воздуха 3 (точка 3, рис. 3), полученное в результате изохорного процесса, характеризуется параметрами V_2 , T_1 и $p_3 = p_0 + \rho gh_2$. Так как в 1 и 3 состояниях воздух имеет одну и ту же температуру, то, применяя закон Бойля – Мариотта, $p_1 V_1 = p_3 V_2$, получим

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_3} \quad (14)$$

Возводим обе части уравнения в степень γ

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \left(\frac{p_1}{p_3}\right)^\gamma \quad (15)$$

и, пользуясь уравнениями (13) и (15), получаем

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{p_1}{p_3}\right)^\gamma$$

Логарифмируя последнее выражение и решая относительно γ , находим

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{p_3}{p_0}\right)}$$

Подставляя в последнее выражение формулы для p_1 и p_3 получаем

$$\gamma = \frac{\ln\left(1 + \frac{\rho gh_1}{p_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\rho gh_1}{p_0}\right) - \ln\left(1 + \frac{\rho gh_2}{p_0}\right)}$$

Так как атмосферное давление $p_0 \gg \rho gh_1$ и $p_0 \gg \rho gh_2$, то величины $\frac{\rho gh_1}{p_0}$ и $\frac{\rho gh_2}{p_0}$ много меньше единицы. Следовательно, мы можем использовать

приближенную формулу для разложения $\ln(1+x) \approx x$, справедливую для малых x . Окончательно получим формулу для вычисления **показателя адиабаты** γ :

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (16)$$

Таким образом, экспериментальное определение $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ сводится к измерению разности уровней жидкости h_1 и h_2 в коленях манометра.

На практике используются различные методы, дающие возможность измерения показателя адиабаты γ . Точность определения γ в данном эксперименте не слишком высока, и поэтому возникают отклонения от теоретически ожидаемого значения $\gamma_{\text{эксн}} < \gamma_{\text{теор}}$.

Это связано не только с тем, что воздух состоит не только из двухатомных молекул и что свойства реального воздуха немного отличаются от свойств идеального газа. Главным образом это связано с несовершенством используемого оборудования. При закрытии пробки С в конце адиабатического процесса (рис. 3) остаются крохотные щели, и воздух понемногу продолжает вытекать из баллона при нагревании. Поэтому уровень h_2 оказывается немного меньшим того уровня, который установился бы при идеально закрытом баллоне. Следовательно, величина γ , согласно данному методу, вычисляется по формуле (16), тоже окажется немного меньшей, чем истинная.

Выполнение работы

Откройте кран Д, и осторожно с помощью груши или насоса нагнетайте воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не достигнет 25–30 см. Закройте кран Д.

Когда давление в баллоне окончательно установится и разность уровней жидкости в манометре В перестанет уменьшаться, сделайте по его шкале отсчет разности уровней жидкости h_1 .

Быстро откройте кран С и тотчас же (как только уровни жидкости в манометре сравняются) его закройте. Когда давление окончательно установится, т.е. разность уровней жидкости в коленях манометра перестанет увеличиваться, сделайте по его шкале отсчет разности уровней h_2 . Опыт повторите 5 – 7 раз, меняя величину h_1 .

Подставляя в формулу (16) значения h_1 и h_2 , взятые для каждого отдельного опыта, вычислите γ , а затем $\langle \gamma \rangle$. Все измеренные и вычисленные величины внесите в таблицу:

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7
h_1 , м							

$h_2, \text{ м}$							
γ							
$\langle \gamma \rangle =$	$\Delta \gamma =$			$\gamma_{теор} =$			

По формуле (12) вычислите теоретическое значение показателя адиабаты $\gamma_{теор}$, считая для воздуха $i = 5$, и сравните полученный результат с $\langle \gamma \rangle$.

Определить погрешность полученного значения показателя адиабаты $\square \gamma = |\gamma_{теор} - \langle \gamma \rangle|$.

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первое начало термодинамики и запишите его для идеального газа.
2. Что такое внутренняя энергия идеального газа?
3. Какой газ можно считать идеальным? От каких термодинамических параметров зависит внутренняя энергия идеального газа?
4. Что такое удельная (молярная) теплоемкость?
5. Какова связь между удельной и молярной теплоемкостью?
6. Какой процесс называют адиабатическим, изохорным?
7. Запишите уравнение адиабаты.
8. Идеальный газ расширяется адиабатически (изохорически). Что при этом происходит с давлением, объемом, температурой и внутренней энергией газа?
9. Выразите C_p , C_v и γ через число степеней свободы i .

Лабораторная работа № 8

Определение абсолютной и относительной влажности воздуха

Приборы и принадлежности: гигрометр Ламбрехта, волосной гигрометр, психрометр Августа.

Введение

Вследствие постоянного испарения воды с поверхности водоемов, почвы и растительного покрова, а также дыхания человека и животных в атмосфере всегда содержится водяной пар. В этой связи **атмосферное давление** представляет собой сумму парциального давления сухого воздуха и находящегося в нем водяного пара. Давление водяного пара будет максимальным при насыщении воздуха паром. Если количество молекул, вылетающих из жидкости (в результате процесса испарения) равно количеству молекул, возвращающихся в жидкость (в результате процесса конденсации), то

пар находится в **динамическом равновесии** с жидкостью, и такой пар называется **насыщенным**.

Иначе: **насыщенный пар** – это пар, имеющий максимальную плотность при данной температуре.

Насыщенный пар, в отличие от ненасыщенного, не подчиняется законам идеального газа. Так, давление насыщенного пара не зависит от объема, но зависит от температуры. Эта зависимость не может быть выражена точно простой формулой, поэтому на основе экспериментального изучения зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры составлены таблицы, по которым можно определить его давление при различных температурах.

Для количественной оценки влажности воздуха используется упругость (парциальное давление) водяного пара p , измеряемое в тех же единицах, что и давление воздуха. Поскольку давление пара пропорционально концентрации молекул, можно определить **абсолютную влажность** как плотность водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре, т. е. величину, равную массе водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха при данных условиях.

Температурная зависимость давления p_H и плотности ρ_H насыщенных водяных паров приведена в таблице 1.

Пользуясь таблицей 1, можно определить, например, плотность насыщенного водяного пара ρ_H при комнатной температуре 20°C :

$$\rho_H = 17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{м}^3$$

Это значит, что при 20°C в воздухе содержится $17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ насыщенного водяного пара. Если температура воздуха, в котором при 20°C содержится насыщенный пар плотностью $17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{м}^3$, понизить, например, до 16°C , то теперь плотность насыщенного пара в нем станет равна $13,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{м}^3$ (ее можно найти по таблице 1). Значит, из каждого кубического метра воздуха вследствие конденсации насыщенного пара выделится $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ воды.

Большинство явлений, зависящих от влажности, например быстрота испарения, высыхание различных веществ, увядание растений, состояние организма и т.д., зависит не от количества водяного пара, находящегося в воздухе, а от того, насколько близко это количество к насыщению, т.е. от **относительной влажности**, которая характеризует степень насыщения воздуха водяным паром.

Относительной влажностью φ называется отношение давления p (или плотности ρ) водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре к давлению p_H (или к плотности ρ_H) водяного пара, насыщающего воздух при той же температуре, выраженное в процентах, т. е.

$$\varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\% \quad (1)$$

или

$$\varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\% \quad (2)$$

Относительная влажность воздуха колеблется в широких пределах. **Днем**, с возрастанием температуры, и, следовательно, с ростом давления p_0 водяного пара, насыщающего воздух, **относительная влажность φ убывает, а ночью возрастает.**

Когда относительная влажность низкая, говорят, что воздух сухой. В этом случае вода испаряется быстро, потому что скорость, с которой молекулы воды испаряются, значительно превышает скорость, с которой они попадают в жидкость. При низкой влажности воздуха пот с нашего тела испаряется легко, при этом мы ощущаем, что тело охлаждается.

Если относительная влажность **высока**, то говорят, что воздух **влажный и удушливый**. Высокая влажность вызывает гнетущее ощущение, поскольку испарение происходит очень медленно. Концентрация паров воды в воздухе в этом случае очень высока, вследствие чего молекулы возвращаются из воздуха в жидкость почти также быстро, как и испаряются. Если пот с тела испаряется медленно, то тело охлаждается очень слабо и мы испытываем от этого неудобство.

При относительной влажности 100 % испарение не может происходить – при таких условиях мокрая одежда или мокрая кожа никогда не высохнут.

При **низкой температуре и высокой влажности** повышается теплоотдача и человек подвергается **переохлаждению**. При **высокой температуре и влажности** теплоотдача, наоборот, резко сокращается, что ведет к **перегреванию** организма. Наиболее благоприятной для человека в средних климатических условиях является относительная влажность **40–60 %**.

Одно и то же количество водяного пара в зависимости от температуры может либо насыщать, либо не насыщать воздух. Понижая температуру воздуха, можно довести находящийся в нем пар до насыщения.

Температура, при которой водяной пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называется **точкой росы**, так как, если водяной пар охладить до температуры ниже точки росы, выпадает роса. Можно сказать иначе: **точка росы** – это температура, которую примет воздух, если его изобарически (не изменяя давления) охладить до состояния насыщения находящегося в нем водяного пара.

При достижении точки росы в воздухе или на предметах, с которыми он соприкасается, начинается конденсация водяного пара. Если относительная влажность $\varphi < 100\%$, то точка росы всегда ниже фактической температуры воздуха. При насыщении, т. е. при $\varphi = 100\%$, фактическая температура соответствует точке росы. По плотности насыщенного водяного пара ρ_H (или p_H), приведенных в таблице 1, можно найти соответствующую этой плотности (или давлению) точку росы.

Описание метода и установки

Для определения влажности воздуха используются приборы, называемые **гигрометрами** и **психрометрами**.

Действие **волосного гигрометра** основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса менять свою длину при изменении влажности, что позволяет измерять относительную влажность от 30 до 100%. Изменение длины волоса, натянутого на металлическую рамку, передается стрелке, которая перемещается вдоль шкалы, проградуированной в процентах. Шкала волосного гигрометра градуируется по абсолютному гигрометру. Этот прибор является основным для измерения влажности при температуре ниже -5°C .

Конденсационный **гигрометр Ламбрехта** представляет собой металлический цилиндр *A*, укрепленный на подставке (рис. 1). Один торец цилиндра отполирован до зеркального блеска и окружен полированным металлическим кольцом *B*, закрепленным на теплоизолирующей прокладке. Цилиндр имеет отверстие *C* для заливки спирта (эфира), закрываемое пробкой с термометром (1), и два патрубка *D* и *E*, на один из которых (*D*) надевается шланг с резиновой грушей (2), а через другой (*E*) выходит воздух с парами спирта (эфира) при продувке. Испарение спирта (эфира) приводит к понижению температуры цилиндра, вследствие чего на полированном торце цилиндра начинает конденсироваться водяной пар, находящийся в воздухе. Поверхность торца при этом тускнеет, что хорошо заметно на фоне кольца.

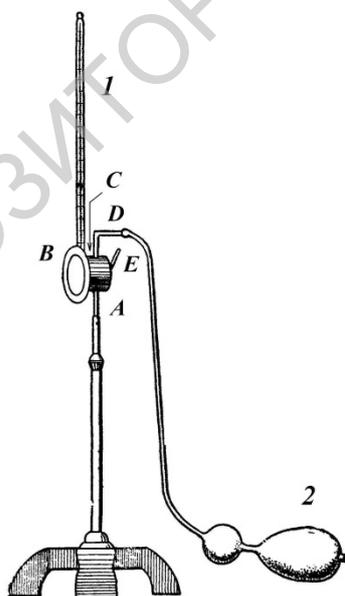


Рис. 1

Температура начала конденсации – точка росы – определяется по показаниям термометра. Для измерения точки росы при очень низких температурах, например в стратосфере, вместо эфира используется жидкий воздух.

Психрометр Августа служит для определения влажности воздуха и его температуры. Он состоит из двух термометров: сухого и влажного. Сухой термометр показывает температуру воздуха, а влажный, теплоприемник которого обвязан ватой или марлей, погруженной в воду, – температуру точки

росы, которая тем ниже, чем интенсивнее идет испарение с поверхности его резервуара.

Когда воздух сухой, вода испаряется с марли, вследствие чего ее внутренняя энергия уменьшается, ведь воду покидают молекулы с наибольшей кинетической энергией, т.е. самые «быстрые» молекулы. С уменьшением внутренней энергии марли ее температура понижается, поэтому влажный термометр показывает более низкую температуру, чем сухой.

Чем суше воздух, тем интенсивнее происходит процесс испарения воды с марли и тем больше **разность** в показаниях сухого и влажного термометров, которую называют **психрометрической разностью температур**. И наоборот, чем воздух влажнее, тем эта разность меньше, так как процесс испарения влаги с марли протекает менее интенсивно. Когда влажность воздуха равна 100%, т.е. когда водяной пар в воздухе насыщенный, показания сухого и влажного термометров одинаковы.

Таким образом, по психрометрической разности температур можно судить о влажности воздуха. Пользуясь специальной психрометрической таблицей (таблица 2), в которой приведены показания сухого термометра и психрометрические разности температур, можно определить соответствующую относительную влажность.

При температуре ниже -5°C , когда содержание водяного пара в воздухе мало, психрометр дает неверные показания.

Выполнение работы

Упражнение 1. Определение влажности воздуха по точке росы.

Ознакомьтесь с устройством гигрометра. Протрите мягкой тканью полированную стенку и кольцо гигрометра до полного блеска.

Измерьте температуру воздуха в комнате.

Наполните сосуд А наполовину спиртом через отверстие С, вставьте в него термометр и присоедините резиновую грушу.

Предупреждение: пары спирта огнеопасны, поэтому не допускайте вблизи прибора открытого пламени.

Установите прибор так, чтобы зеркальная поверхность его была расположена под углом 30° – 40° к направлению луча зрения. Продувайте воздух через спирт и внимательно следите за полированной поверхностью стенки камеры, сравнивая ее с поверхностью кольца. О моменте появления росы судите по потускнению поверхности (по сравнению с кольцом) отполированной стенки.

Определите, по возможности точно, температуру t_1 начала этого потускнения с помощью термометра.

Уменьшая поток воздуха, заметьте температуру t_2 исчезновения росы.

Определение t_1 и t_2 проведите не менее трех раз. Результаты опыта запишите в таблицу:

Температура окружающего воздуха, °С	Температура появления росы t_1 , °С	Температура исчезновения росы t_2 , °С	Точка росы t , °С

Рассчитайте среднее значение из полученных величин (t_1 и t_2). Это и есть точка росы t .

Пользуясь таблицей 1 по величине t , определите значение абсолютной влажности, а по значению комнатной температуры – давление насыщающих паров воды. Зная эти величины, определите значение относительной влажности φ по формуле (1). Можно использовать для расчета φ формулу (2).

Упражнение 2. Определение влажности воздуха с помощью психрометра Августа.

Ознакомьтесь с устройством психрометра.

Снимите показания температуры сухого (t_C) и влажного ($t_{ВЛ}$) термометров.

Вычислите разность температур ($t_C - t_{ВЛ}$).

С помощью психрометрической таблицы 2 найдите относительную влажность воздуха (в %).

Пользуясь таблицей (1) найдите давление насыщенного водяного пара в комнате при комнатной температуре, а затем абсолютную влажность воздуха, т.е. давление водяных паров в атмосферном воздухе по формуле:

$$P = \frac{\varphi \cdot P_H}{100} \quad (3)$$

Упражнение 3. Определение влажности воздуха волосным гигрометром.

Ознакомьтесь с устройством и принципом действия волосного психрометра.

Снимите показания и сравните их с результатами предыдущих опытов.

Подышите на волос гигрометра и наблюдайте за поведением стрелки.

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какой пар называют насыщенным?
2. Когда пар находится в динамическом равновесии с жидкостью?
3. Что такое абсолютная влажность воздуха?
4. Что такое относительная влажность воздуха?
5. Что такое точка росы?
6. Какие приборы служат для измерения влажности воздуха?
7. Как устроен волосной гигрометр?
8. Что представляет собой гигрометр Ламбрехта?
9. Что представляет собой гигрометр Августа? Для чего он предназначен?

Таблица 1

**Зависимость давления p и плотности ρ
насыщенного водяного пара от температуры**

$t, ^\circ\text{C}$	$p_H, 10^3 \text{ Па}$	$\rho_H, 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_H, 10^3 \text{ Па}$	$\rho_H, 10^{-3} \text{ кг/м}^3$
-5	0,40	3,2	10	1,23	9,4
0	0,61	4,8	11	1,33	10,0
1	0,65	5,2	12	1,40	1,07
2	0,71	5,6	13	1,49	11,4
3	0,76	6,0	14	1,60	12,1
4	0,81	6,4	15	1,71	12,8
5	0,88	6,8	16	1,81	13,6
6	0,93	7,3	17	1,93	14,5
7	1,0	7,8	18	2,07	15,4
8	1,06	8,3	19	2,20	16,3
9	1,14	8,8	20	2,33	17,3

Таблица 2

Психометрическая таблица

Показания сухого тер- мометра, $^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометра, $^\circ\text{C}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительная влажность, %											
0	100	81	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Лабораторная работа № 9

Определение коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давления

Приборы и принадлежности: прибор для определения коэффициента поверхностного натяжения, набор капилляров, сосуды с исследуемыми жидкостями, химический стаканчик, фильтровальная бумага.

Введение

Если рассмотреть состояние равновесия двух соприкасающихся веществ, находящихся в различных фазах (например, жидкость – газ, жидкость – твердое тело), то молекулы, расположенные в тонком слое, непосредственно прилегающем к поверхности раздела, находятся в условиях, отличных от условий молекул, находящихся в объеме. Они взаимодействуют не только с молекулами своей фазы, но также с близлежащим слоем молекул чужой фазы. Поэтому физические свойства поверхности раздела (она имеет толщину порядка радиуса молекулярного взаимодействия) отличаются от свойств вещества, находящегося внутри объема. Работа по переходу частицы из объема некоторого вещества на его поверхность выполняется за счет уменьшения его внутренней энергии dU , т.е. $dA = -dU$. Если эта работа выполняется при постоянной температуре, то

$$dA = -\sigma dS \quad (1)$$

где dS – элемент поверхности; σ – **коэффициент поверхностного натяжения** (или поверхностное натяжение).

Следовательно, внутренняя энергия элемента поверхностного слоя вещества (или поверхностная энергия) будет равняться:

$$dU = \sigma dS \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что коэффициент поверхностного натяжения σ представляет собой внутреннюю энергию единицы поверхности жидкости и измеряется в системе СИ в Дж / м².

С другой стороны, в случае жидкой поверхности раздела **поверхностное натяжение** можно рассматривать также как силу, действующую на единицу длины контура поверхности жидкости и стремящуюся сократить эту поверхность до минимума при заданном объеме фаз. При таком подходе единица измерения поверхностного натяжения будет Н / м.

Поверхностное натяжение зависит от природы вещества, образующего поверхность раздела фаз, и от температуры. Оно не зависит от площади поверхности, ее величины и формы, если объемы фаз достаточно велики по сравнению с размерами молекул.

Благодаря поверхностному натяжению, жидкость при отсутствии внешних воздействий, т. е. в равновесии, принимает форму шара – минимальное значение площади и минимум внутренней энергии. Обычно мы наблюдаем жидкости, находящиеся под действием силы земного тяготения. В этом

случае жидкость принимает форму, соответствующую минимуму суммарной энергии – потенциальной энергии в поле сил тяготения и поверхностной энергии.

Поверхностное натяжение влияет на условие равновесия фаз. Например, условие равновесия в системе, состоящей из двух фаз 1 и 2 и поверхности раздела при постоянной температуре T можно записать в виде:

$$dU = 0,$$

где $dU = dU_1 + dU_2 + dU_{\text{поверх.}} = -p_1 dV_1 - p_2 dV_2 + \sigma dS = 0$, где p_1, p_2 – давление в фазах 1 и 2, а V_1, V_2 – их элемент объема. Так как объем всей системы остается постоянным, т.е. $V = V_1 + V_2$, то можем записать

$$(p_2 - p_1)dV_1 + \sigma dS = 0,$$

И, следовательно,

$$p_1 = p_2 + \sigma \frac{dS}{dV} \quad (3)$$

или

$$p_1 = p_2 + \Delta p,$$

где $\Delta p = \sigma \frac{dS}{dV}$.

Величина $\frac{dS}{dV}$ представляет собой **кривизну поверхности раздела**. Если эта поверхность раздела представляет собой сферу радиуса r , то

$$\frac{dS}{dV} = \frac{d(4\pi r^2)}{d(\frac{4}{3}\pi r^3)} = \frac{4\pi 2r dr}{\frac{4}{3}\pi 3r^2 dr} = \frac{2}{r}$$

и уравнение (3) принимает вид:

$$p_1 = p_2 + 2\frac{\sigma}{r} \quad (4)$$

Для сферической поверхности раздела выражение $\Delta p = 2\frac{\sigma}{r}$ называется **давлением Лапласа**, а уравнение (4) – **формулой Лапласа**. Формула Лапласа показывает, что давление в первой фазе уравнивается суммой давлений во второй фазе и давлением Лапласа. В случае плоской поверхности раздела $r \rightarrow \infty$ и давление Лапласа Δp обращается в нуль.

Итак, стремление поверхности к сокращению приводит к изменению давления под искривленной поверхностью на величину давления Лапласа, которое пропорционально поверхностному натяжению σ и кривизне поверхности. Под выпуклой поверхностью давление больше на величину давления Лапласа Δp по сравнению с давлением p_0 над плоской поверхностью, а под вогнутой – меньше на Δp (рис. 1).



Поверхностное натяжение на границе раздела двух фаз оказывает решающее влияние на **капиллярные явления**, вызываемые искривлением поверхности раздела. К капиллярным явлениям относят обычно явления в жидких средах, вызванные искривлением их поверхности, граничащей с другой жидкостью, газом или паром. Искривление поверхности ведет к появлению в жидкости дополнительного капиллярного давления Δp .

Так, например, условия образования эмульсии, жидких аэрозолей, пен во многом определяются кривизной поверхности частиц, которая вызывает возникновение капиллярных явлений.

Еще пример. Если поверхность частицы или тела является смачиваемой, то может возникнуть конденсация пара в капиллярах и микротрещинах пористых тел, а также в промежутках между тесно сближенными твердыми частицами или телами. Капиллярная конденсация начинается с адсорбции молекул пара поверхностью конденсации и образования вогнутых менисков жидкостей. Капиллярное давление (давление Лапласа) Δp под таким вогнутым мениском будет меньше, чем давление насыщенного пара p_0 над плоской поверхностью, что вызовет конденсацию пара. Капиллярная конденсация увеличивает поглощение (сорбцию) паров пористыми телами, что играет большую роль в процессах сушки.

Капиллярное впитывание играет существенную роль в водоснабжении растений, передвижении влаги в почве и других пористых телах. Капиллярная пропитка различных материалов широко применяется в процессах химической технологии.

Рассмотрим поведение жидкости, налитой в широкий сосуд, при погружении в нее одним концом капилляра. Поверхностное натяжение приведет к тому, что вблизи стенок капилляра поверхность жидкости искривляется, образуя так называемый, **мениск**. Если жидкость имеет вогнутый мениск и смачивает стенки капилляра, то поверхность этого капилляра называется гидрофильной. Примерами гидрофильных поверхностей являются карбонаты, силикаты, сульфаты, кварц. Если жидкость имеет выпуклый мениск и не смачивает стенки капилляра, то поверхность его называется гидрофобной. Примерами гидрофобных поверхностей являются чистые металлы, сульфиды, графит.

Как отмечалось ранее, давление под мениском будет отличаться от давления над плоской поверхностью на величину давления Лапласа Δp :

$$\Delta p = 2 \frac{\sigma}{r}$$

т. к. мениск представляет собой элемент сферической поверхности радиуса r . Под действием этого давления жидкость в капилляре будет подниматься при $\Delta p < 0$ (мениск вогнутый) или опускаться при $\Delta p > 0$ (мениск выпуклый).

Между жидкостью в капилляре и в широком сосуде устанавливается разность уровней h , при которой капиллярное давление (давление Лапласа) Δp уравновешивается гидростатическим давлением ρgh (рис. 2 а), т.е.

$$2\frac{\sigma}{r} = \rho gh, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости в капилляре, g – ускорение силы тяжести, r – радиус кривизны мениска, который связан с радиусом капилляра R по формуле $\frac{R}{r} = \cos \theta$ (рис. 2 б). Если считать жидкость полностью смачивающей, то $\angle \theta = 0$ и $r = R$.

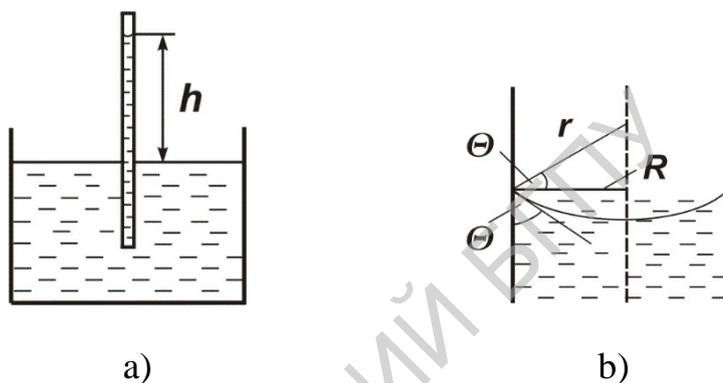


Рис. 2

Допустим, увеличивая внешнее давление над поверхностью жидкости в капилляре на величину $\Delta p'$ нам удалось сравнять уровни жидкости в сосуде и капилляре, т.е. уравновесить внешнее гидростатическое давление $\Delta p'$ капиллярным давлением $2\frac{\sigma}{r}$:

$$2\frac{\sigma}{r} = \Delta p'$$

Тогда из полученной формулы можно определить коэффициент поверхностного натяжения σ :

$$\sigma = \frac{\Delta p' \cdot r}{2} \quad (6)$$

Описание установки и метода

Прибор для определения коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давлений поверхностного слоя жидкости показан на рисунке 3. В стаканчик 1 наливается исследуемая жидкость и в нее опускается капилляр 2, который при помощи трубки 3 соединен с водным манометром 4. Широкая стеклянная трубка 5 опускается в стакан с водой 8, расположенный на столике 6, который винтом 7 можно закрепить в любом горизонтальном положении. После соприкосновения трубки 5 с поверхностью воды при

опускании или поднятии столика 6, изменяется давление над поверхностью жидкости в капилляре 2.

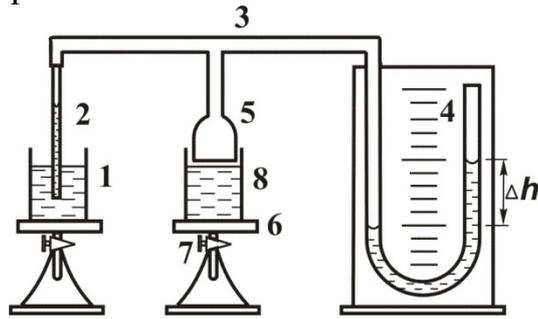


Рис. 3

Выполнение работы

Налейте исследуемую жидкость в стаканчик 1, опустите туда капилляр 2. Жидкость в капилляре поднимется и установится на некоторой высоте. Надо следить, чтобы столбик жидкости в капилляре не содержал пузырьков воздуха. Если они имеются, то он плохо промывает, промойте его еще раз.

Медленно поднимите столик 6, на котором находится стакан с водой 8, и подведите уровень жидкости в капилляре 2 до уровня жидкости в сосуде 1. Закрепите столик 6 винтом 7 и сделайте отсчет разности уровней жидкости в манометре Δh по манометру 4.

Зная плотность жидкости в манометре ρ и считая жидкость полностью смачивающей, т. е. радиус кривизны r равен радиусу капилляра R , по формуле (6), в которой $\Delta p' = \rho g \Delta h$, вычислите значение σ .

Опыт проделайте несколько раз и вычислите среднее значение $\langle \sigma \rangle$.

Данные вычислений и измерений запишите в таблицу:

	$\Delta h, м$	$\Delta p', Па$	$\rho, кг / м^3$	$r, м$	$\sigma, Н / м$	$\langle \sigma \rangle, Н / м$

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения и поясните, отчего он зависит?
2. Назовите единицы измерения коэффициента поверхностного натяжения.
3. Чем объясняются капиллярные явления? Приведите примеры капиллярных явлений.
4. От чего зависит высота поднятия жидкости в капилляре?
5. Запишите формулу Лапласа для сферических поверхностей раздела.
6. Почему в жаркую погоду разрыхляют почву?

Лабораторная работа № 10

Определение среднего теплового коэффициента линейного расширения тел

Приборы и принадлежности: прибор для исследования расширения твердых тел, набор исследуемых образцов цилиндрической формы, набор пробирок, термометр.

Введение

Твердые тела, которые имеют упорядоченное, периодически повторяющееся в пространстве расположение своих частиц, называются кристаллическими. Частицы, из которых состоит кристалл, образуют в пространстве правильную кристаллическую решетку, которая состоит из элементарных ячеек определенной геометрической формы (прямоугольники, ромбы, шестиугольники и т. д.). В вершинах (узлах) кристаллической решетки могут располагаться атомы, молекулы или ионы и по типу сил взаимодействия между ними выделяется четыре основные группы решеток:

Ионная решетка: в узлах ее находятся попеременно положительные и отрицательные ионы. Например, каменная соль (рис. 1).

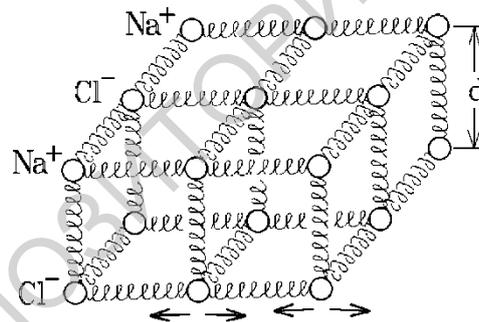


Рис. 1

Атомная решетка: в узлах – атомы (например, графит).

Молекулярная решетка: в узлах – молекулы (например, двухатомный газ Cl_2).

Металлическая решетка: в узлах ее расположены положительно заряженные ионы, а внутри свободно двигаются оторвавшиеся электроны (например, металлы).

В отличие от газов, молекулы и атомы жидких или твердых сред сильно взаимодействуют между собой. В твердых телах следует говорить о межатомном взаимодействии. Если атомы одинаковы, то между ними возникают обменные силы квантовой природы, и в этом случае межатомная связь называется ковалентной или металлической.

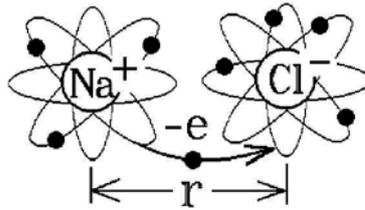


Рис.2

Если атомы различны, то может случиться так, что электрону из атомной оболочки атома одного сорта энергетически выгодно перейти в электронную оболочку атома другого сорта. Образуются два иона, притягиваемые друг к другу электрической силой, это происходит, например, при образовании молекулы $NaCl$ (рис. 2). Подобная связь называется ионной. Тогда, если ионы Na^+ и Cl^- раздвинуть на большое расстояние r , то между ними действует

кулоновская сила притяжения $F_{кул} = \frac{ke^2}{r^2}$, где e – заряд электрона. Если же ионы сильно сблизить, то в первую очередь сближаются их одноименно заряженные отрицательные электронные оболочки, и электрические силы начинают отталкивать ионы.

Независимо от природы сил, стягивающих кристаллическую решетку, характер изменения этих сил с расстоянием r между атомами (или другими элементами, составляющими решетку) будет одинаков (рис. 3 а). В дальнейшем для определенности будем говорить об атомной кристаллической решетке. Расстояние r_0 соответствует равенству сил отталкивания и притяжения между атомами, т.е. их равновесному состоянию. Слева от точки r_0 , т.е. с уменьшением расстояния между атомами преобладают силы отталкивания, а справа от точки r_0 , т.е. с увеличением расстояния между атомами будут преобладать силы притяжения, которые быстро убывают с ростом r .

Потенциальная энергия взаимодействия двух нейтральных атомов может быть в общем случае записана в виде:

$$U = -\frac{a}{r^6} + \frac{b}{r^8} \quad (1)$$

где a и b – константы, имеющие разные значения для различных атомов. Первое слагаемое характеризует **энергию притяжения**, а второе – **энергию отталкивания** между атомами. Кривая, соответствующая этой потенциальной энергии взаимодействия, представлена на рисунке 3 б. Она имеет крутой подъем в сторону малых расстояний, пологий подъем с асимптотическим приближением к нулю в сторону больших расстояний, а для некоторого равновесного состояния при $r = r_0$ имеет минимум U_{min} – это наименьшее значение потенциальной энергии, когда силы отталкивания и притяжения уравновешены.

Однако даже при равенстве сил отталкивания и притяжения атомы не находятся в покое, а совершают малые колебания вблизи положения равновесия (см. рис. 3 б). Такие колебания атомов вблизи узлов кристаллической решетки называются тепловыми колебаниями решетки.

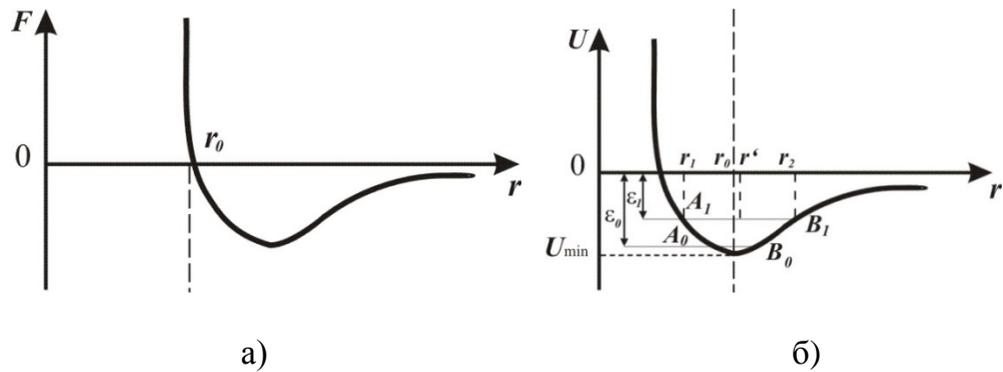


Рис. 3

Амплитуды такого колебания являются величинами порядка 10^{-9} м и составляют незначительную долю от расстояния между атомами, которое примерно равно $1,5 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$. **Полная энергия** колеблющегося атома складывается из потенциальной и кинетической энергий и, поскольку атом в кристалле находится в связанном состоянии, то эта энергия является величиной отрицательной. Как известно, в газе средняя кинетическая энергия атома равна $\frac{3}{2}kT$. Для атома в кристалле кинетическая энергия также пропорциональна kT .

Повышение температуры кристалла приводит к увеличению энергии колебательного движения атомов в узлах кристаллической решетки. При этом соответственно возрастает амплитуда этих колебаний. Однако увеличение амплитуды колебаний еще не говорит об увеличении линейных размеров тела. В самом деле, если бы колебания были гармоничны, то каждый атом, на сколько бы приближался к соседнему, на столько бы отдалялся от другого, что не приводило бы к изменению среднего межатомного расстояния, а значит, и к тепловому расширению. В действительности, атомы в кристаллических решетках совершают не гармонические, а ангармонические колебания, что можно видеть исходя из рис. 3 б.

Поясним это. При абсолютном нуле температуры T_0 полная энергия ϵ_0 (изображенная на графике потенциальной энергии) будет отлична от нуля, что находит свое объяснение только в рамках квантовой механики. При этой энергии атомы колеблются между положениями A_0 и B_0 , что соответствует среднему расстоянию между атомами r_0 . С ростом температуры до T_1 средняя полная энергия атома увеличится, например, до ϵ_1 . Атомы будут колебаться уже между положениями A_1 и B_1 , что соответствует расстояниям r_1 и r_2 . Значит, среднее расстояние r' между соседними атомами при температуре T_1 , т.е. $r' = \frac{r_1 + r_2}{2}$ будет больше, чем r_0 . При дальнейшем увеличении температуры, вследствие несимметричности формы кривой потенциальной энергии относительно значения U_{\min} , расстояние r_2 будет расти значительно быстрее, чем r_1 , и, следовательно, среднее расстояние между атомами будет

увеличиваться. Другими словами, поскольку силы отталкивания с уменьшением расстояния преобладают над силами притяжения, то атому «легче» удалиться от соседнего атома, чем приблизиться к нему.

Таким образом, мы получили качественное объяснение **механизма теплового расширения твердых тел** – он связан с несимметричностью тепловых колебаний атомов, благодаря чему межатомные расстояния с ростом температуры увеличиваются. Вывод количественных соотношений требует более глубокого физического анализа, поэтому ограничимся только приведением конечного результата.

Допустим, при некоторой начальной температуре T_0 длина тела была l_0 . В результате нагрева длина тела увеличилась и стала l . Тогда абсолютное удлинение будет: $\Delta l = l - l_0$. Относительное линейное удлинение тела $\frac{\Delta l}{l_0}$ будет расти примерно пропорционально температуре T :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha T$$

где α – **коэффициент линейного расширения** твердого тела, который характеризует **относительное удлинение** $\frac{\Delta l}{l_0}$ тела при его нагревании на один градус K и имеет обычно порядок $10^{-5} K^{-1}$.

Коэффициенты линейного расширения:

Вещество	$\alpha, 10^{-5}, K^{-1}$	Вещество	$\alpha, 10^{-5}, K^{-1}$
Алюминий	2,6	Латунь	1,9
Серебро	1,9	Молибден	0,5
Золото	1,4	Платина	0,4
Железо	1,2	Стекло	1,0
Никель	1,3	Хром	0,8
		Фарфор	0,3

В общем случае тепловое расширение кристалла анизотропно, т. е. в разных направлениях коэффициенты линейного расширения будут отличаться друг от друга. Значения коэффициентов теплового расширения вдоль кристаллографических осей x, y, z определяются симметрией кристалла. Так, например, для кристаллов с кубической структурой, так же, как и для изотропных тел, коэффициенты линейного расширения равны во всех направлениях. Для большинства тел $\alpha > 0$, но существуют исключения. Например, вода при нагревании от $0^{\circ} C$ до $4^{\circ} C$ при атмосферном давлении сжимается, т.е. $\alpha < 0$. Зависимость α от температуры наиболее заметна у газов.

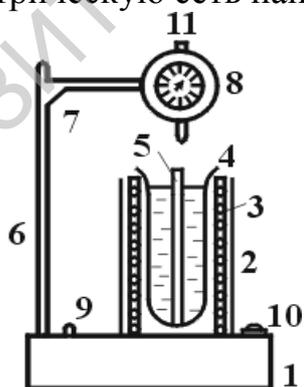
Например, для идеального газа $\alpha \propto \frac{1}{T}$, у жидкостей она проявляется слабее. У

некоторых тел, например, кварц, коэффициент α мал и практически постоянен в широком интервале температур. При $T \rightarrow 0$ коэффициент α также будет стремиться к нулю.

Описание установки

В данной работе необходимо исследовать изменение длины предлагаемых образцов при их нагревании и на основании полученных данных определить для них среднее значение теплового коэффициента линейного расширения. Для этой цели используется специальный прибор, снабженный чувствительным индикатором для определения удлинения образца при его нагревании (цена деления на шкале индикатора составляет 0,01 мм). Для исследования предлагаются образцы (стальной, стеклянный (кварцевый), латунный) длиной по 160 мм каждый и стеклянные пробирки для их нагревания.

Прибор (рис. 4) состоит из корпуса 1, к которому крепится защитный кожух 2, внутри которого установлен электрический нагреватель 3. При проведении опытов в нагреватель помещается пробирка 4 с исследуемым стержнем 5. Исследуемый образец нагревается в воде, находящейся в стеклянной пробирке. На корпусе прибора установлена стойка 6 с кронштейном 7 для индикатора малых перемещений 8. Кронштейн может поворачиваться вокруг оси стойки 6 на 90° . На панели корпуса расположена индикаторная лампа 9 и кнопочный выключатель 10. Штепсельная вилка служит для включения прибора в электрическую сеть напряжением 220 В



1 Рис. 4

Выполнение работы

Наполните пробирку на три четверти ее объема водой и с помощью термометра измерьте начальную температуру воды t_1 .

Опустите в пробирку испытуемый стержень (образец) сферическим концом вниз и поместите ее в нагреватель.

Оттяните штوك 11 индикатора 8 вверх и поворотом кронштейна 7 установите индикатор над пробиркой.

Опустите шток в углубление на торце стержня (образца) и кронштейн зафиксируйте винтом. Отметьте положение стрелки индикатора, соответствующее начальной длине образца.

Вставьте штепсельную вилку в электрическую розетку на рабочем столе и кнопочным выключателем включите прибор (при этом должна загореться индикаторная лампочка).

Нагревание образца ведите до закипания воды в пробирке. Температура образца t_2 равна температуре кипения воды (100°C).

Удлинение образца Δl определите по отклонению стрелки индикатора от первоначального положения, умножив число делений при этом отклонении на цену деления.

Выключите прибор кнопочным выключателем и индикатор на поворотном кронштейне отведите в сторону, предварительно оттянув шток индикатора вверх.

Замените исследуемый образец другим и повторите для него операции пунктов 1–8 (при повторном эксперименте необходимо охладить стержень и пробирку до температуры окружающей среды для того, чтобы избежать заметных искажений в измерениях).

Для каждого образца проведите 3–5 измерений.

Вычислите значения коэффициентов теплового линейного расширения для каждого исследуемого образца по формуле $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}$, где l_0 – начальная длина образца ($l_0 = 160 \text{ мм}$), $\Delta T = T_2 - T_1$ – изменение температуры образца (T_1 и T_2 – температура Кельвина, $T = t^\circ\text{C} + 273^\circ$). Необходимо учесть, что разность температур по Кельвину ΔT равна разности температуры по Цельсию $\Delta t = t_2 - t_1$. Найдите для каждого образца среднее значение коэффициента теплового линейного расширения $\langle \alpha \rangle$.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

№	$l_0, \text{ м}$	$\Delta T, \text{ К}$	$\Delta l, 10^{-5} \text{ м}$	$\alpha, 10^{-5}, \text{ К}^{-1}$	$\langle \alpha \rangle, 10^{-5}, \text{ К}^{-1}$

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Почему твердые тела при нагревании расширяются?
2. Что называют абсолютным и относительным удлинением?
3. Из чего складывается полная энергия колебательного движения атомов?
4. Каков физический смысл коэффициента линейного расширения тел?
5. Чему равна потенциальная энергия колеблющегося атома?
6. Назовите единицы измерения коэффициента линейного расширения твердых тел.
7. Приведите примеры учета теплового расширения тел в технике.

Лабораторная работа № 11

Изучение дифракционной решетки

Приборы и принадлежности: источник света, гониометр, прозрачная дифракционная решетка.

Введение

В работе определяются длины волн спектральных линий, угловая дисперсия решетки и дается понятие о ее разрешающей способности.

Дифракцией волн называется любое отклонение при распространении волны от законов геометрической оптики. *Геометрическая оптика* – это математическое описание с помощью евклидовой геометрии *прямолинейного распространения* световых лучей, подчиняющихся законам отражения и преломления. *Световой луч* – это прямая, идущая вдоль распространения световых волн. Поскольку свет является волной, то для того, чтобы охарактеризовать его поведение при встрече с любым препятствием, нам достаточно знать две величины: *длину волны λ* и *размер препятствия d* . Оказывается, что если $\lambda \gg d$, то наблюдается *дифракция*, которая проявляется в явлении попадания света в область геометрической тени; если длина волны λ величина такого же порядка как и размер препятствия d , то свет рассеивается незначительно, а в случае, если длина волны λ много меньше размера препятствия d , т.е. $\lambda \ll d$, то свет распространяется *прямолинейно*, подчиняясь законам геометрической оптики. Согласно **принципу Гюйгенса – Френеля**, каждая точка волнового фронта волны сама является источником вторичных волн, которые, интерферируя между собой (т. е. налагаясь друг на друга), создают на экране **интерференционную картину** – чередование полос разной интенсивности света. Такая интерференционная картина будет являться устойчивой, если источники волн являются когерентными. Когерентными мы называем источники, для которых разность фаз не зависит от времени или изменяется во времени по определенному закону. В случае некогерентных источников никакого чередования полос на экране не будет, а освещенность поверхности экрана будет монотонно убывать по мере удаления от источника. Интерференционную картину, полученную от щели или от дифракционной решетки, обычно называют **дифракционным спектром**.

Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа одинаковых, отстоящих друг от друга на одном и том же расстоянии, щелей. Простейшая оптическая дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которой с помощью делительной машины нанесен ряд параллельных штрихов, которые являются практически непрозрачными для света. Неповрежденные части пластинки являются щелями, пропускающими свет.

На рис.1 показана дифракционная решетка с шириной щели b , шириной препятствия a . Сверху на решетку падает волновой фронт световой волны. *Волновой фронт* – это геометрическое место точек, колеблющихся в

одинаковой фазе. Например, для *плоской* волны волновой фронт – *плоскость*, а для *сферической* – поверхность *сферы*. Световая волна, проходя через дифракционную решетку, попадает на линзу M , а далее на экран N , расположенный в фокальной плоскости линзы. Исходя из принципа Гюйгенса – Френеля на экране в точке P возникает результирующее колебание с амплитудой A . Интенсивность света в точке P будет определяться квадратом модуля амплитуды этого результирующего колебания, т.е. $|A|^2$.

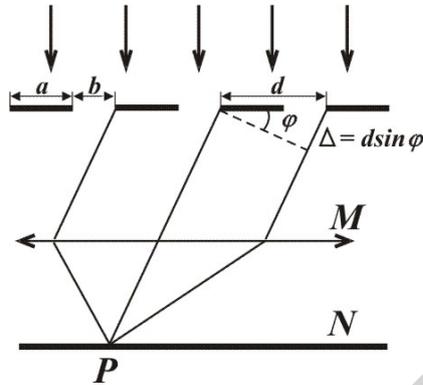


Рис. 1

Для примера рассмотрим вначале дифракцию на одиночной щели (рис. 2). Дифракционный спектр, возникший в результате дифракции плоской монохроматической волны на щели, рассчитывается по методу зон Френеля, основанном на принципе Гюйгенса–Френеля. Он заключается в следующем. Волновая поверхность AC параллельно краям щели разбивается на узкие полоски $01, 12, 01', 02'$ (зоны Френеля) таким образом, чтобы разность хода лучей, идущих от двух соседних зон Френеля, например CF , равнялась половине длины волны, т.е. $CF = \lambda / 2$. Учитывая ширину щели b и число зон, на данном рисунке равное четырем, из прямоугольного треугольника ABC определим разность хода крайних лучей, идущих в точку P :

$$\frac{BC}{AC} = \sin \varphi,$$

откуда $AC \cdot \sin \varphi = BC$, т.е. $b \sin \varphi = 4 \cdot \frac{\lambda}{2}$, где φ – угол дифракции, под которым видна на экране точка P .

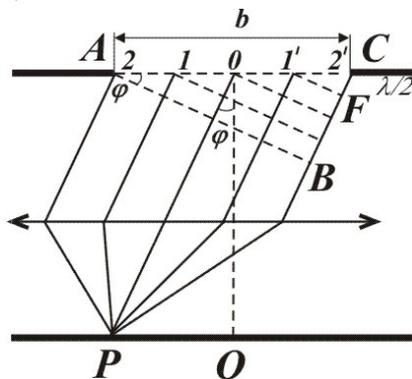


Рис. 2

Так как для каждой пары соседних зон разность хода лучей составляет $\lambda / 2$, то колебания в каждой зоне будут происходить в противоположных фазах

и они погасят друг друга. В данном случае имеется две пары зон, в каждой из которых колебания будут погашены и в точке P будет наблюдаться дифракционный минимум – темная полоса. Если в общем случае число зон будет k , т.е. $b \sin \varphi = k \cdot \frac{\lambda}{2}$, то при четном значении $k = 2n$ на экране в точке P образуется минимум. При нечетном значении $k = 2n + 1$ одна зона окажется нескомпенсированной и на экране в точке P появится светлая полоса – **дифракционный максимум**. Если угол дифракции φ равен нулю, то в этом случае все волны в одинаковой фазе придут в точку O и усилят друг друга. На экране мы увидим светлую полосу – **центральный максимум**.

Теперь выясним характер дифракционной картины, получающейся на экране при нормальном падении на дифракционную решетку плоской световой волны. Колебания, создаваемые каждой щелью дифракционной решетки, являются когерентными. В данном случае происходит сложение колебаний световых волн, идущих от каждой щели и имеющих одинаковые амплитуды, но сдвинутых друг относительно друга по фазе на одну и ту же величину. В итоге на экране возникает дифракционная картина: чередование полос различной интенсивности. Минимум интенсивности для дифракционной решетки наблюдается при условии

$$b \sin \varphi = \pm n\lambda, \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – порядок спектра; λ – длина волны; φ – угол дифракции, т.е. угол под которым наблюдается соответствующая полоса спектра; b – ширина щели.

Максимумы интенсивности для дифракционной решетки будут соответствовать условию

$$d \sin \varphi = \pm n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

где $d = a + b$ – **постоянная дифракционной решетки**; a – ширина промежутков между щелями.

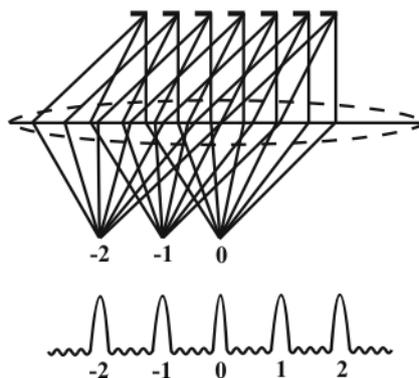


Рис. 3

Главный (центральный) максимум нулевого порядка – один, а главных максимумов первого, второго и т. д. порядков – по два, расположенных симметрично от центральной светлой полосы.

Знаки (\pm) показывают слева или справа от центрального максимума рассматривается полоса дифракционного спектра. Предельное число спектров,

которое можно получить при помощи решетки, дается соотношением $n \leq \frac{d}{\lambda}$, которое определяется из (2) при условии, что угол φ принимает значения $\pm \frac{\pi}{2}$.

Основными характеристиками дифракционной решетки, являются ее разрешающая способность и дисперсия.

Разрешающая способность дифракционной решетки, согласно условию Релея показывает, когда еще возможно видеть раздельно две монохроматические спектральные линии. Разрешающая способность решетки R определяется по формуле

$$R = nN \quad (3)$$

Обычно порядок спектра n невелик. Следовательно, большая разрешающая способность решетки достигается за счет большего числа штрихов решетки N .

Линейная дисперсия D_L определяется линейным расстоянием ΔS между спектральными линиями, отнесенным к разности их длин волн $\Delta \lambda$ и определяется по формуле

$$\frac{\Delta S}{\Delta \lambda} = D_L F, \quad (4)$$

где F – фокусное расстояние объектива трубы, снабженной окулярным микрометром, с помощью которой измеряется расстояние ΔS .

Угловая дисперсия определяется угловым расстоянием между двумя спектральными линиями, отнесенным к разности их длин волн

$$D = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda} \quad (5)$$

Угловую дисперсию для решетки можно подсчитать по формуле

$$D = \frac{n}{d \cos \varphi} \quad (6)$$

Для небольших углов отклонения $\cos \varphi = 1$ и для спектра первого порядка (при $n = 1$) угловая дисперсия решетки постоянна: $D \approx \frac{1}{d}$. Поэтому дифракционные спектры решетки иногда называются «нормальными». Возможность получения спектров с помощью дифракционной решетки используется в спектральных приборах, которые широко применяются в биологии, химии, медицине для определения состава вещества.

Выполнение работы

Упражнение 1. Определение длин волн спектральных линий.

Установите решетку с известной постоянной d на столике гониометра.

Включите источник света.

Установите нуль по лимбу таким образом, чтобы он совпадал с направлением на главный максимум спектра нулевого порядка.

Определите угол дифракции φ_1 , под которым наблюдается красная линия в спектре 1-го порядка справа от главного максимума. Для этого совместите визирную линию окуляра с серединой красной полосы и сделайте отсчет угла φ_1 по лимбу.

Сделайте такой же отсчет угла дифракции для красной полосы спектра слева от главного максимума. Это будет угол φ_2 .

Найдите среднее значение для углов φ_1 и φ_2 .

Занесите полученные значения углов φ_1 , φ_2 и $\langle \varphi \rangle_{\text{сред.}}$ для $n=1$ в таблицу.

Рассчитайте длину волны λ исследуемой линии, используя формулу (2) для $n=1$.

Проведите измерения для красной линии спектра второго порядка и рассчитайте ее длину волны для $n=2$.

Найдите среднюю длину волны для красной линии спектра.

Аналогичные измерения и вычисления проведите для зеленых и фиолетовых полос спектра.

Полоса спектра	n	φ_1 , град	φ_2 , град	$\langle \varphi \rangle$, град	λ , 10^{-9} м	$\langle \lambda \rangle$, 10^{-9} м
Красная	1					
	2					
Зеленая	1					
	2					
Фиолетовая	1					

Упражнение 2. Определение разрешающей способности и угловой дисперсии решетки.

Оцените разрешающую способность решетки. Зная постоянную решетки и измерив линейкой длину решетки, можно найти число штрихов в ней N . (Разумеется, такая оценка числа N предполагает, что освещены и работают все штрихи решетки.) Порядок дифракционного спектра n , входящий в выражение для разрешающей способности, надо взять из опыта, определив, какой наивысший из дифракционных спектров имеет еще достаточную для наблюдения интенсивность (в редких случаях у учебных решеток n оказывается больше 3 или 4).

Угловую дисперсию определяем по формуле (6), а линейную дисперсию, при наличии окулярного микрометра, по формуле (4).

Контрольные вопросы

1. Что называется дифракцией света?
2. Какой вид имеет дифракционная картина от одной щели в белом и монохроматическом свете?

3. Что называется дифракционной решеткой?
4. Запишите условия, определяющие положение максимумов и минимумов дифракционной решетки.
5. как определяется предельное число спектров дифракционной решетки?
6. Что называется угловой и линейной дисперсией решетки?
7. Что такое разрешающая способность решетки?

Лабораторная работа № 12

Исследование магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянного тока, двойной переключатель, соединительные провода.

Введение

Магнитное поле – это силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом. Вместе с электрическим полем оно образует единое электромагнитное поле.

Основной характеристикой магнитного поля является векторная величина – **индукция** магнитного поля \vec{B} . Если в магнитное поле, индукция которого \vec{B} , поместить проводник длиной l , по которому течет ток I , то на него со стороны магнитного поля будет действовать так называемая **сила Ампера**, модуль F которой определяется следующим образом:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между направлением \vec{B} и направлением тока в проводнике; I – сила тока в проводнике; l – длина проводника.

Модуль магнитной индукции B равен отношению максимального значения модуля силы Ампера \vec{F} , действующий на проводник с током со стороны магнитного поля, к силе тока I в проводнике и его длине l :

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l} \quad (2)$$

В системе СИ за единицу индукции магнитного поля принята индукция такого однородного магнитного поля, в котором на один метр проводника, по которому течет ток в 1 А, действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица обозначается **тесла** (Тл).

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н} / \text{А} \cdot \text{м}$$

Наряду с индукцией \vec{B} существует **другая характеристика** магнитного поля – **напряженность** \vec{H} , связанная с магнитной индукцией \vec{B} соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н / А}^2$, μ – относительная магнитная проницаемость среды – физическая величина, показывающая во сколько раз индукция B магнитного поля в среде отличается по модулю от индукции B_0 магнитного поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (4)$$

За **единицу напряженности** магнитного поля принят 1 А / м . Удобным и наглядным способом графического изображения магнитного поля служит построение его силовых линий. Силовая линия магнитного поля – линия, касательная к которой в каждой точке указывает направление индукции магнитного поля \vec{B} . Густота этих линий, т. е. число линий, проходящих через единицу поверхности, будет характеризовать величину индукции магнитного поля.

Магнитное поле Земли, образующее земную **магнитосферу**, простирается до расстояния в 70–80 тысяч километров в направлении на Солнце и на многие миллионы километров в противоположном направлении (уменьшение радиуса действия магнитного поля Земли в направлении Солнца вызвано действием солнечного ветра). На рисунке 1 показан ход магнитных силовых линий вокруг земного шара, а также положение векторов \vec{B}_T индукции геомагнитного поля и его проекций B_B и B_G в точке, находящейся на расстоянии R от центра Земли (СГП, ЮГП – Северный и Южный географические полюса; N, S – геомагнитные полюса; N_m, S_m – полюса эквивалентного магнита; φ_m – геомагнитная широта, отсчитываемая от геомагнитного экватора).

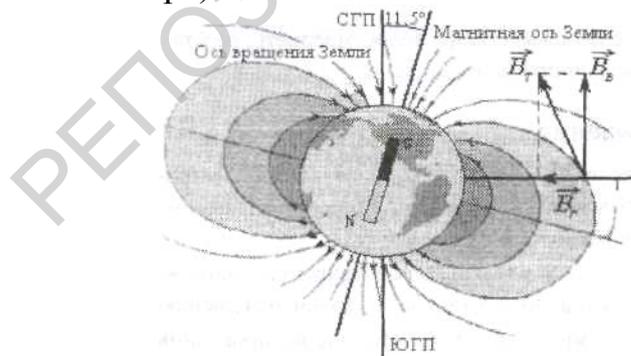


Рис. 1

В первом приближении на не слишком больших удалениях от поверхности Земли ее магнитное поле таково, как если бы земной шар представлял собой магнит с осью, направленной приблизительно с севера на юг, проходящей через центр Земли и наклоненной на $11,5^\circ$ к оси вращения Земли (рис 1), а еще более точно при смещении магнита на 436 км в сторону Тихого океана.

Точки пересечения поверхности земного шара с осью упомянутого выше смещенного относительно земного центра магнита-диполя, называют **геомагнитными полюсами** (N, S).

Вертикальные плоскости, проходящие через северный и южный магнитные полюса Земли, называются **плоскостями магнитного меридиана**. Так как географические и магнитные полюса не совпадают, то и плоскости географического и магнитного меридианов также не совпадают, они образуют между собой угол, называемый **углом склонения**.

Магнитное поле Земли состоит из постоянного магнитного поля, обусловленного магнетизмом самого земного шара и переменного магнитного поля электрических токов, текущих над земной поверхностью и в земной коре. По наиболее вероятной гипотезе **постоянное магнитное поле Земли** обусловлено существованием электрических токов, протекающих в верхних слоях земного ядра. Причиной же **переменного магнитного поля**, которое не превышает 1 % от постоянного поля, являются электрические токи в верхних слоях атмосферы.

Постоянное магнитное поле Земли неодинаковое в различных ее точках. Изучение магнитного поля Земли показало, что оно имеет тенденцию отклонения от какого-то среднего значения его интенсивности в отдельных территориях Земли и в связи с вековыми его изменениями. В первом случае наблюдают так называемые **магнитные аномалии** (Восточно-Сибирская, Магнитогорская и др.). Вековые изменения магнитного поля неодинаковы на земном шаре: существуют так называемые места векового хода, в которых эти изменения наиболее интенсивны, а в некоторых местах они совсем незначительны. Установлено также перемещение магнитных полюсов и магнитных аномалий. Изучение магнитного поля Земли показало, что направление магнитной оси Земли не всегда было одинаковым.

У поверхности Земли магнитное поле H равно в среднем $39,8 \text{ А/м}$ на границе магнитосферы $\sim 0,08 \text{ А/м}$. В околоземном пространстве магнитное поле образует **магнитную ловушку** для заряженных частиц высоких энергий – **радиационный пояс**.

Большое количество опытных фактов, накопленных к настоящему времени, свидетельствует о влиянии магнитных полей (слабых и сильных) на биологические объекты. Воздействие магнитных полей на биологические объекты изучает раздел биофизики, называемый **магнитобиологией**. Многие животные и растения способны ориентироваться в магнитных полях; магнитное поле влияет на свойства крови, интенсивность водного обмена, активность многих ферментов, быстроту прорастания и всхожесть семян, резкие изменения напряженности магнитного поля Земли (магнитные бури) влияют на самочувствие людей и поведение животных, магнитные поля влияют на течение биологических процессов и некоторых химических реакций. Свойства воды, побывавшей в магнитном поле (как показывают опыты), сильно меняются. Магнитные поля используются при диагностики различных заболеваний, а также в лечебной медицинской практике.

Существование магнитного поля можно обнаружить с помощью магнитной стрелки. Если магнитную стрелку подвесить на нити (рис.2) так, чтобы точка подвеса совместилась с ее центром тяжести, то стрелка

установится по направлению вектора индукции \vec{B} магнитного поля в данной точке. В северных широтах северный конец магнитной стрелки будет направлен вниз и образует какой-то угол с горизонтальной плоскостью. Этот угол называют **углом наклоения** (на экваторе он равен нулю).

Вектор магнитной индукции \vec{B} (рис. 2) можно разложить на две составляющие вертикальную \vec{B}_B и горизонтальную $\vec{B}_Г$. Если магнитная стрелка установлена на вертикальной оси, то ее направление совпадет с направлением горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли $\vec{B}_Г$ и расположится в плоскости магнитного меридиана.

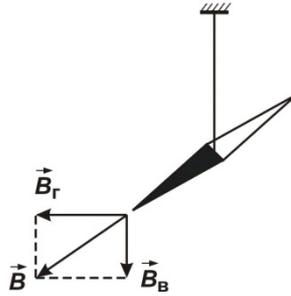


Рис. 2

В данной работе определяется горизонтальная составляющая магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

Описание установки и метода

Тангенс-гальванометр содержит несколько круговых витков проволоки, составляющих его катушку, закрепленную на подставке (рис 3). В центре витков на вертикальной оси установлена магнитная стрелка, вокруг которой расположена шкала с нанесенными на ней делениями в градусах. Отсчет делений можно делать от нулевого значения в двух направлениях шкалы. Прибор со шкалой можно поворачивать вокруг вертикальной оси для установления северного полюса стрелки на нулевую отметку.



Рис. 3

При отсутствии тока в витках тангенс-гальванометра его магнитная стрелка установится в плоскости магнитного меридиана; направление магнитной стрелки совпадет с направлением горизонтальной составляющей $\vec{B}_Г$ вектора индукции магнитного поля Земли. Если к катушке подключить источник постоянного тока, то на магнитную стрелку, кроме магнитного поля Земли, будет действовать и магнитное поле катушки с током. Направление

вектора индукции магнитного поля катушки с током можно определить по **правилу буравчика**: если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в проводнике, то поступательное движение буравчика совпадет с направлением вектора индукции магнитного поля кругового тока в его центре. В центре катушки вектор ее магнитной индукции \vec{B}_K будет перпендикулярен плоскости витков катушки и направлен под углом α к направлению горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли \vec{B}_r (рис. 4). В результате магнитная стрелка устанавливается по направлению вектора \vec{B} , равного векторной сумме векторов \vec{B}_r и \vec{B}_K :

$$\vec{B} = \vec{B}_r + \vec{B}_K \quad (5)$$

Если плоскость витков катушки установить в плоскости магнитного меридиана (в плоскости, в которой располагается магнитная стрелка при отсутствии тока в катушке), то в этом случае при прохождении тока в катушке векторы \vec{B}_r и \vec{B}_K будут взаимно перпендикулярны (рис 5).

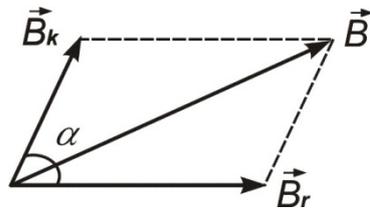


Рис. 4

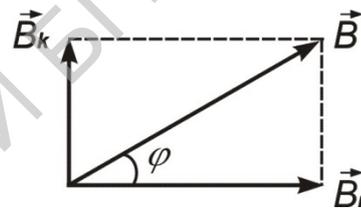


Рис. 5

В результате магнитная стрелка расположится в направлении вектора \vec{B} и отклонится от своего первоначального положения на угол φ .

Из рис. 5 имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_K}{B_r} \quad (6)$$

откуда

$$B_r = \frac{B_K}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (7)$$

Индукцию магнитного поля в центре катушки тангенс-гальванометра определим по формуле:

$$B_K = \frac{\mu \mu_0 N \cdot I}{2R} \quad (8)$$

где $\mu = 1$ (для воздуха), N – число витков катушки, I – величина тока в ней, R – ее радиус.

Тогда, подставив (8) в (7), получим

$$B_r = \frac{\mu \mu_0 N \cdot I}{2R \cdot \operatorname{tg} \varphi} \quad (9)$$

или

$$B_H = \frac{\mu\mu_0 N \cdot I}{D \cdot \operatorname{tg}\varphi} \quad (10)$$

где $D = 2R$ – диаметр катушки.

Для определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли собирают электрическую цепь по схеме (рис. 6). Величина тока в цепи регулируется реостатом R и измеряется амперметром. Двойной переключатель Π служит для изменения направления тока в катушке.

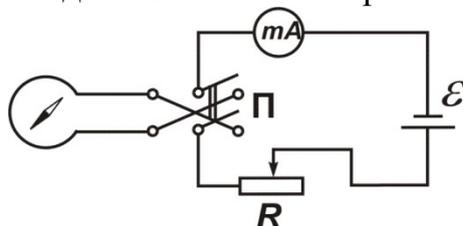


Рис. 6

Выполнение работы

Упражнение 1. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

Соберите электрическую цепь по схеме рисунка 6.

Расположите витки катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли. В этом случае катушка и магнитная стрелка должны находиться в одной плоскости.

Установите ноль шкалы против северного полюса магнитной стрелки.

Включите источник питания, подайте постоянное напряжение 10 В.

Установите переключатель Π в любое из положений, чтобы через катушку протекал электрический ток.

Перемещая подвижный контакт реостата R , установите такой ток, чтобы стрелка тангенс-гальванометра отклонилась от первоначального положения на угол $\varphi_1 = 45^\circ$. Запишите отсчет угла отклонения стрелки φ_1 в таблицу.

Не изменяя величины тока, с помощью переключателя Π измените направление тока на обратное и снимите отсчет угла отклонения стрелки φ_2 .

Запишите величину тока I , протекающего через амперметр.

При несовпадении значений углов φ_1 и φ_2 рассчитайте их среднее значение:

$$\varphi_{\text{ср.}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

Повторите измерения (п.п. 5 – 8) при других пяти-семи значениях тока. Значения тока должны быть таковы, чтобы стрелка амперметра находилась в правой части его шкалы (предел измерения амперметра – 1 А).

С помощью линейки измерьте диаметр катушки D .

По формуле (10) рассчитайте величину горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли B_H для каждого опыта.

Вычислите среднее значение $\langle B_H \rangle$.

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

№	I, A	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi_{cp}, ^\circ$	$D, 10^{-2} м$	N	$B_T, 10^{-6} Тл$	$\langle B_T \rangle, 10^{-6} Тл$

Проанализируйте полученное численное значение \bar{B} и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Дать определение магнитного поля.
2. Характеристики магнитного поля (индукция \vec{B} и напряженность магнитного поля \vec{H}) и единицы их измерения.
3. Дать определение силовой линии магнитного поля.
4. Что представляет собой магнитное поле Земли?
5. Дать определение геомагнитных полюсов, плоскости магнитного меридиана, угла склонения, угла наклона.
6. Расскажите о воздействии магнитных полей на биологические объекты.
7. Как обнаружить магнитное поле?
8. Расскажите, что представляет собой тангенс-гальванометр.
9. Как рассчитать индукцию магнитного поля в центре катушки тангенс-гальванометра?
10. Записать рабочую формулу для расчета горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

Лабораторная работа № 13

Дозиметрия ионизирующих излучений

Приборы и принадлежности: дозиметр-радиометр бытовой АНРИ 01 «Сосна», радиоактивный источник β -излучения, прибор для измерения времени, кювета с чистой питьевой водой, кювета с пробой.

Введение

Свойство атомных ядер самопроизвольно изменять свой состав (заряд Z , массовое число A) путем испускания элементарных частиц или ядерных фрагментов называется **радиоактивностью**. Радиоактивный распад может происходить, если данное превращение энергетически выгодно, т. е. если разность между массой исходного ядра и суммарной массой продуктов распада положительна. Некоторые из существующих в природе ядер радиоактивны (**естественная радиоактивность**), но большинство радиоактивных элементов получены искусственно в результате ядерных реакций (**искусственная радиоактивность**). Излучение ядер, встречающихся в природных условиях, плюс излучение, приходящее к нам из космоса, составляют **естественный радиоактивный фон**.

Существуют следующие типы радиоактивных превращений ядер.

Альфа-распад (α -распад) – распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием α -частиц. Альфа – частица – ядро ${}^4_2\text{He}$, содержащее 2 протона и 2 нейтрона.

Бета-распад (β -распад) – самопроизвольные (спонтанные) превращения нейтрона n в протон p и протона в нейтрон внутри атомного ядра, сопровождающиеся испусканием электрона e^- или позитрона e^+ и электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$ или нейтрино ν_e .

Радиоактивный распад часто сопровождается **гамма-излучением**, испускаемым в результате электромагнитных переходов между различными квантовыми состояниями одного и того же ядра.

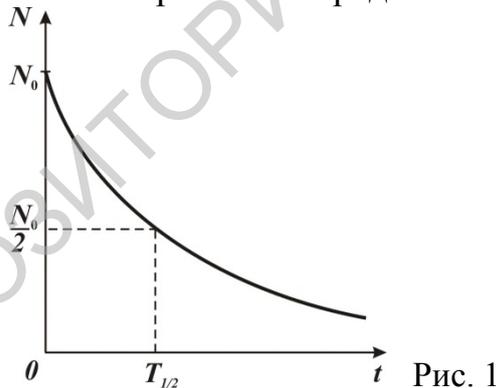
Гамма-излучение (γ -излучение) – коротковолновое электромагнитное излучение, представляющие собой поток частиц – гамма – квантов (фотонов).

Радиоактивный распад рассматривается теоретически как статистический процесс, в котором распад каждого ядра – случайное событие, имеющее определенную вероятность. Закон радиоактивного распада имеет вид:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

где N_0 – число ядер в начальный момент времени $t_0 = 0$, а N – число нераспавшихся ядер в момент t . Число N уменьшается с течением времени.

График зависимости N от времени t представлен на рисунке 1.



Величина λ в формуле (1) называется **постоянной радиоактивного распада**. Она характеризует вероятность радиоактивного распада и равна доле ядер, распадающихся за единицу времени:

$$\lambda = \frac{|dN|}{Ndt} \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что **период полураспада элемента $T_{1/2}$** (время, в течение которого распадается половина имеющегося в наличии количества ядер) равен

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (3)$$

Значения $T_{1/2}$ известных радиоизотопов колеблются в пределах от 10^{-3} с до 10^9 лет.

Количество радиоактивного вещества можно было бы, разумеется, выразить в килограммах. Однако проще и удобнее характеризовать массу радиоактивного вещества его **активностью** – числом актов распада в одну секунду. В системе СИ за единицу активности принимают одно ядерное превращение в секунду (**1 распад/с**). Эта единица носит название **1 беккерель (1 Бк)**. Таким образом:

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с.}$$

На практике часто применяют единицу измерения активности – **1 кюри (1 Ки)**. **Активность 1 Ки** имеет такое радиоактивное вещество, в котором за 1 с происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада (такую активность имеет 1 г радия).

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

Рассмотрим влияние α –, β – и γ – излучений на вещество. Попадая в вещество, **альфа-частица**, благодаря наличию у нее заряда, равного $2 \cdot e$, взаимодействует с его атомами или молекулами за счет кулоновских сил: ионизирует и возбуждает их. Расстояние, на котором резко обрываются ионизация и другие взаимодействия α – излучения, называется **длиной свободного пробега α – частицы** или просто **пробегом**.

Из-за интенсивного взаимодействия с веществом **пробег α – частиц невелик** (в газах при атмосферном давлении – несколько сантиметров, в твердых телах порядка 10^{-4} см, в жидкостях и биологических тканях – до 0,1 мм). Лист бумаги или одежда полностью задерживают α – частицы.

Ионизирующая способность (способность ионизировать атомы и молекулы в результате взаимодействия частиц со средой) α – частиц **велика** и составляет около **10^5 пар ионов** на длине пробега. Поэтому, если радиоактивное вещество, излучающее α – частицы, попадает в организм (например, при вдыхании воздуха, через открытую рану или с пищей), возможность повреждения организма в этом случае очень большая.

Ионизирующая способность β^+ – и β^- – частиц в сотни раз меньше, чем у α – частиц (благодаря меньшему значению электрического заряда). Поэтому их **пробег** больше (в газах – десятки метров, в металлах – несколько миллиметров, в биологических тканях – до 15 мм). Зимняя одежда защищает тело от внешнего β – излучения. При работе с источником β – излучения рекомендуется применять защитные очки с толщиной стекла 6 мм. Для защиты кожи рук необходимо использовать защитные перчатки и дистанционный инструмент.

Поскольку γ – **кванты** электрически нейтральны, то γ – излучение обладает **очень высокой проникающей способностью** (в газах – сотни метров, в свинце – до 5 см; тело человека эти лучи способны пронизывать насквозь). **Ионизирующая способность γ – излучения** невелика – порядка ста пар ионов на длину пробега.

Существует 3 способа защиты от γ – излучения:

- 1) временем;
- 2) расстоянием;

3) экранировкой (бетонные стены толщиной 1,5–2,0 м или слой свинца толщиной 0,12 мм и 1,4 мм для 2-х кратного ослабления γ – излучения с энергией 0,1 МэВ и 2 МэВ соответственно).

Ранее мы говорили об активности радиоактивного вещества. Введем теперь понятия удельной и объемной активности. Активность единицы массы вещества называют **удельной активностью**:

$$A_{уд.} = \frac{A}{m} \quad (4)$$

$$\text{В системе СИ } [A_{уд.}] = 1 \frac{Ки}{кг}.$$

Активность единицы объема вещества называют **объемной активностью**:

$$A_v = \frac{A}{V} \quad (5)$$

$$\text{В системе СИ } [A_v] = 1 \frac{Ки}{м^3}.$$

Удельная и объемная активности являются показателем загрязненности радионуклидами различных объектов, например, пищевых продуктов. Действующими сейчас Республиканскими допустимыми уровнями (РДУ) установлены предельно допустимые удельная и объемная активности питьевой воды и продовольственных продуктов

Один из основных принципов, положенных в основу расчета РДУ, состоит в том, что наиболее часто употребляемые продукты должны иметь меньшую активность. Так, наименьшую активность должна иметь питьевая вода ($2,7 \cdot 10^{-10} Ки / кг$). Допустимая РДУ удельная активность продовольственных продуктов, обусловленная содержанием в них цезия – 137 (^{137}Cs) и стронция – 90 (^{90}Sr), представлена в таблице 1.

Таблица 1

**Допустимая РДУ удельная активность
продовольственных продуктов, обусловленная содержанием
в них цезия-137 и стронция-90**

№ п/п	Наименование продукта	Ки/кг, Ки/л	Бк/кг, Бк/л
<i>Для радионуклидов цезия – 137</i>			
1	Вода питьевая	$2,7 \cdot 10^{-10}$	10
2	Молоко и цельномолочная продукция	$2,7 \cdot 10^{-9}$	100
3	Молоко сухое	$5,4 \cdot 10^{-9}$	200
4	Мясо и мясные продукты	$1,35 \cdot 10^{-8}$	500
5	Картофель и корнеплоды	$2,16 \cdot 10^{-9}$	80
6	Хлеб и хлебопродукты	$1,08 \cdot 10^{-9}$	40
7	Мука, крупы, сахар, мед	$1,6 \cdot 10^{-9}$	60
8	Жиры растительного и животного происхождения	$2,7 \cdot 10^{-9}$	100

9	Фрукты и ягоды	$1,89 \cdot 10^{-9}$	70
10	Консервированные продукты из овощей и садовых фруктов и ягод	$2,0 \cdot 10^{-9}$	74
11	Грибы сушеные	$1,0 \cdot 10^{-7}$	2500
12	Детское питание всех видов в готовом виде	$1,0 \cdot 10^{-9}$	37
13	Прочие продукты питания в готовом виде	$1,0 \cdot 10^{-8}$	370
<i>Для стронция – 90</i>			
1	Вода питьевая	$1,0 \cdot 10^{-11}$	0,37
2	Молоко и цельномолочная продукция	$1,0 \cdot 10^{-10}$	3,7
3	Хлеб и хлебопродукты	$1,0 \cdot 10^{-10}$	3,7
4	Картофель и корнеплоды	$1,0 \cdot 10^{-10}$	3,7
5	Детское питание всех видов в готовом для употребления виде	$5,0 \cdot 10^{-11}$	1,85

Излучаемые радиоактивным источником частицы образуют **поток**, измеряемый числом частиц в 1с. Величина, равная отношению потока ионизирующих частиц к площади поверхности, перпендикулярной направлению движения частиц, называется **плотностью потока** ионизирующих частиц ($1 \text{ част}/\text{с} \cdot \text{м}^2$). **Интенсивность ионизирующего** излучения определяется отношением потока энергии ионизирующего излучения к площади поверхности, перпендикулярной направлению излучения ($1 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

Чтобы уберечь себя от тяжелых последствий воздействия разных видов излучения, необходимо иметь представление о дозиметрических измерениях, допустимых уровнях радиоактивного облучения, т.е. уметь быстро оценить мощность доз. Дозиметрия возникла вместе с рождением рентгеновского аппарата (1895 г.).

Степень воздействия лучей на биологические объекты определяется в основном величиной **поглощенной энергии**, которая характеризуется **поглощенной дозой**.

Поглощенная доза – количество энергии излучения, поглощенной единицей массы облучаемого тела (тканями организма):

$$D_n = \frac{\square E}{\square m}. \quad (6)$$

В системе СИ единицей поглощенной дозы является **1 грей (1 Гр)**. Грей соответствует поглощенной дозе, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

На практике используется внесистемная единица поглощенной дозы – **1 рад**. Один рад соответствует поглощению 0,01 Дж энергии 1 кг облучаемого вещества, т.е.

$$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж} / \text{кг} = 10^{-2} \text{ Гр}$$

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Практически оценить поглощенную дозу сложно, поэтому пользуются понятием **экспозиционной дозы**, оцениваемой по ионизирующему воздействию излучения на воздух.

Экспозиционная доза γ – излучения есть величина, равная отношению суммарного заряда всех ионов одного знака, образованных излучением в элементе объема воздуха, к массе m воздуха в этом объеме:

$$D_{\text{экс.}} = \frac{\sum Q}{m} \quad (7)$$

В системе СИ единицей экспозиционной дозы является **1 Кл/кг** – это такая доза облучения фотонным излучением (рентгеновским или гамма), которая в 1 кг облучаемого воздуха образует суммарный электрический заряд всех ионов одного знака, равный 1 Кл.

В качестве внесистемной единицы экспозиционной дозы для рентгеновского и γ – излучения используется **1 рентген (1 Р)** – такая доза рентгеновского или γ – излучения, которая вызывает в 1 см³ (0,001293 г) воздуха при нормальных условиях появление $2,083 \cdot 10^9$ пар ионов, суммарный заряд которых равен $\frac{1}{3} \cdot 10^9$ Кл.

Используются дольные единицы Р: $1 \text{ мР} = 10^{-3} \text{ Р}$, $1 \text{ мкР} = 10^{-6} \text{ Р}$.

Для других видов излучения используется внесистемная единица экспозиционной дозы **1 ФЭР** – физический эквивалент рентгена. **1 ФЭР** соответствует дозе облучения α , β или другими частицами, которые вызывают ту же ионизацию, что и доза γ – излучения в 1 Р.

При одной и той же поглощенной дозе разные виды излучения вызывают неодинаковые повреждения биологических объектов: α – частицы из-за большой ионизирующей способности (≈ 30 пар ионов на 1 мм воздуха) в сравнении с электронами или γ – квантами (несколько пар ионов на 1 мм воздуха) гораздо опаснее.

Коэффициент, показывающий во сколько раз данный вид излучения более биологически опасен, чем рентгеновское и γ – излучение при одинаковой поглощенной дозе, называют **коэффициентом качества кк**.

Величину, равную произведению **поглощенной дозы** излучения на его **коэффициент качества кк** называют **эквивалентной дозой** ионизирующего излучения:

$$D_{\text{эkv.}} = kк \cdot D_{\text{погл.}} \quad (8)$$

Средние значения коэффициентов качества для разных видов и энергий излучения даны в таблице 2.

Таблица 2

№ п/п	Вид излучения	коэффициент качества (кк)
1	Рентгеновское γ – излучение	1

2	Электроны и позитроны	1
3	β – излучение	1
4	Протоны с энергией < 10 МэВ	10
5	Нейтроны с энергией < 20 МэВ	3
6	Нейтроны с энергией 0,1-10 МэВ	10
7	α – излучение с энергией < 10 МэВ	20

В системе СИ единицей измерения эквивалентной дозы является **1 Зиверт** – эквивалентная доза любого вида излучения, поглощенная 1 кг «средней» биологической ткани и создающая такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр эталонного рентгеновского излучения. В качестве **эталонного источника** применяют излучение рентгеновских аппаратов с энергией 180 – 200 кэВ.

Внесистемной единицей эквивалентной дозы является **1 бэр** (биологический эквивалент рентгена). **Бэр** - доза любого вида излучения, поглощенная 1 г «средней» биологической ткани, при которой наблюдается тот же биологический эффект, что и при поглощенной дозе 1 рад эталонного рентгеновского излучения. Связь между *Зивертом* и *бэр*м следующая:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$$

$$1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$$

В 1988 г. была разработана концепция безопасного проживания для населения, исходя из средней продолжительности жизни 70 лет, устанавливающая предел эквивалентной дозы «350 мЗв (35 бэр) за жизнь».

Все ядерные излучения (за исключением нейтринного) могут причинять повреждения человеческому организму. Их вредное влияние обусловлено ионизацией и возбуждением атомов живых клеток организма. Отдельные составные части живой клетки изменяются или разрушаются от этой ионизации, и продукты разложения начинают действовать как яды. Примерами нарушений в организме являются разрушение хромосом, набухание ядер клеток и вообще клеток, изменения в проницаемости клеточных мембран и разрушение клеток. Часто нормальный процесс замены клеток организма новыми клетками полностью нарушается из-за неспособности облученных клеток производить себе подобные, когда на них попадает ионизирующее излучение. Наиболее чувствительны к радиоизлучению – клетки костного мозга, лимфатических желез, полости рта и кишечника, половых органов, фолликул волос и кожи. Меньшей чувствительностью обладают ткани печени и почек. И, наконец, менее всего реагируют на радиоизлучение нервы, мозг и ткани мускулов.

Таким образом, разные органы и ткани человека имеют разную чувствительность к воздействию ионизирующего излучения, т.е. разные значения **коэффициентов радиационного риска (КРР)**.

Если для организма в целом $KPP = 1$, то для красного костного мозга он равен 0,12, для половых желез – 0,25, для молочных желез – 0,15, для легких – 0,12, для щитовидной железы – 0,03 и т. д.

Умножив эквивалентную дозу на соответствующие КРР и просуммировав по всему организму, органу или группе органов, получим **эффективную эквивалентную дозу** ($D_{э\text{э}}$), отражающую суммарный биологический эффект облучения:

$$D_{э\text{э}} = \sum_{i=1}^n KPP_i \cdot D_{э\text{кв}.i}, \quad (9)$$

где KPP_i – КРР для i -го органа; $D_{э\text{кв}.i}$ – эквивалентная доза излучения, поглощенная этим органом.

Для характеристики зависимости воздействия дозы от времени вводится понятие **мощности дозы** P , определяемой соотношением:

$$P = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \quad \text{где} \quad (10)$$

ΔD – доза, полученная объектом за время Δt .

За единицу измерения **мощности поглощенной дозы** в системе СИ принят **1 Гр/с**, **мощности экспозиционной дозы** – **1 А/кг**; соответственно внесистемные единицы – **1 рад/ч** и **1 Р/ч**.

Основной задачей дозиметрии является оценка степени опасности ионизирующих излучений и разработка способов защиты от них. Для измерения активности радиоактивных веществ, поглощенной и экспозиционной доз облучения и степени загрязнения радиоактивными веществами продуктов питания и воды, используют различные дозиметрические приборы.

Прежде чем приступать к выполнению данной лабораторной работы, необходимо ознакомиться с инструкцией к **дозиметру-радиометру** бытового АНРИ.01 «Сосна».

Назначение

Дозиметр-радиометр бытовой АНРИ.01 «Сосна» (далее по тексту «прибор») предназначен для индивидуального использования населением с целью контроля радиоактивного состояния на местности в жилых и рабочих помещениях, в том числе:

- измерения мощности экспозиционной дозы гамма излучения;
- измерения плотности потока бета – излучения с загрязненных поверхностей;
- оценка объемной активности радионуклидов в пробах.

Устройство прибора

1. Дозиметр-радиометр выполнен в виде портативного прибора, который носят на ремешке или в кармане одежды.

2. Корпус прибора выполнен из ударопрочной пластмассы и состоит из двух частей, соединенных между собой винтами. В верхней части на лицевой панели расположены органы управления и индикации, отсек источника питания с крышкой. Внутри верхней части корпуса размещены две платы, на которых установлены радиодетали. В нижней части корпуса расположена плата с

установленным на ней счетчиком излучения. К нижней части корпуса крепится поворотная задняя крышка, являющаяся экранирующим фильтром. Между датчиком и задней крышкой установлена тонкая пленочная прокладка.

3. Расположение элементов конструкции и органов управления и индикации приведено на рисунке 2.

4. На боковой поверхности корпуса есть гнездо разъема (поз.2, рис. 2) для подключения выносных блоков детектирования. При работе прибора от внутренних источников ионизации в это гнездо должна быть вставлена заглушка (поз.13, рис.2).

5. При механических повреждениях прокладки с пленки (поз.12, рис. 2) конструкция прибора позволяет установку потребителем новой защитной прокладки с комплекта запасных частей.

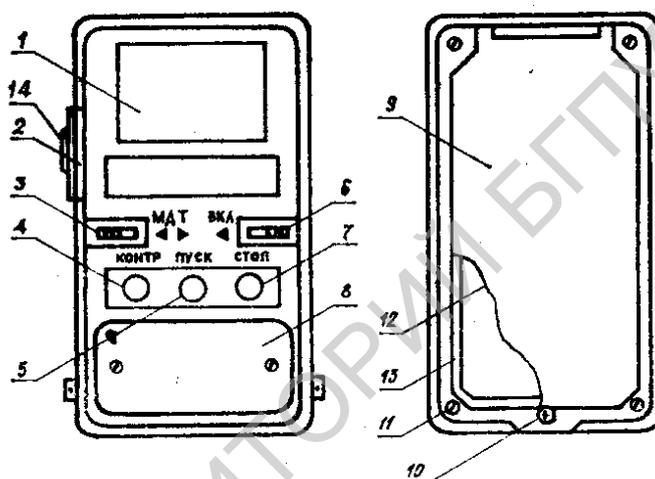


Рис. 2

1. Числовое жидкокристаллическое табло.
2. Гнездо разъема для подключения выносного блока детектирования.
3. Переключатель положений работы «МД» и «Т».
4. Кнопка контроля работоспособности прибора.
5. Кнопка «пуск», включение измерений.
6. Выключатель питания.
7. Кнопка «стоп»/«пуск», выключение измерений.
8. Крышка отсека элемента питания.
9. Задняя крышка.
10. Фиксатор задней крышки.
11. Место пломбирования.
12. Прокладка защитная.
13. Рамка.
14. Заглушка.

Краткое описание принципа работы

1. При работе прибора преобразователь напряжения подает через токоограничивающие R – C цепочки на аноды газоразрядных счетчиков

напряжение $\approx 400 В$. При попадании в рабочие объемы счетчиков ионизирующих частиц на табло счетчиков появляются импульсы. Количество импульсов подсчитывается электронной схемой и отображается на табло жидкокристаллического индикатора.

2. При установлении переключателя 3 в положение «МД» в приборе **работает внутренний таймер**, который через определенное время останавливает число импульсов. Величина продолжительности временного интервала и частота прохождения импульсов генератора таймера подбирается при регулировании таким образом, чтобы обеспечить прямой отсчет величины мощности экспозиционной дозы γ -излучения в $мР/ч$ на числовом табло.

3. При установлении переключателя 3 в положение «Т» **таймер прибора не работает**. Время отсчета импульсов контролируется потребителем по часам. На числовом табло индуцируется количество импульсов за данный период времени. При снижении напряжения источника «Корунд» ниже допустимого значения ($7В$) срабатывает схема сигнализации. Прибор выдает постоянный звуковой сигнал. Схема сигнализации выдает также звуковой сигнал после окончания времени измерения, если переключатель 3 находится в положении «МД» и короткий звуковой сигнал при прохождении каждого десятого импульса, если переключатель 3 находится в положении «Т».

4. Схема пересчета прибора выполнена таким образом, что при установлении переключателя 3 в положение «Т» фиксируется каждый импульс, а при установлении переключателя 3 в положение «МД» – каждый второй импульс, приходящий от счетчиков прибора.

5. В схеме прибора предусмотрена возможность проверки исправности работы пересчетной схемы. При установлении переключателя 3 в положение «МД» необходимо нажать кнопку «контроль» (поз.4) и удерживать в нажатом положении, а затем кнопкой «пуск»/«стоп» (поз.7) обеспечить подсчет числа импульсов. При этом на вход схемы подаются импульсы от генератора таймера. За время измерения, заданное таймером, на числовом табло индикатора при исправной работе пересчетной схемы должно появиться число 1,024.

6. Прибор имеет **четыре режима работы**:

1) В режиме «поиск» (переключатель 3 в положении «Т») прибор служит для **грубой оценки радиационного состояния** по частоте прохождения звукового сигнала. В этом режиме прибор ведет подсчет числа импульсов от счетчика прибора и подает короткий звуковой сигнал через каждые 10 импульсов.

2) В режиме измерения мощности экспозиционной (полевой эквивалентной) дозы γ – излучения (переключатель 3 в положении «МД») прибор ведет в течении $(20 \pm 5)с$ подсчет импульсов от счетчиков прибора. После окончания подсчета, время которого задается внутренним таймером прибора, на числовом табло индуцируется число, соответствующее мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в $мР/ч$.

3) В режиме измерения плотности потока бета – излучений с загрязненных поверхностей необходимо проведение двух измерений

исследуемой поверхности: с открытой и закрытой задней крышкой прибора (поз. 9). Время измерений в этих случаях задается внутренним таймером прибора. Результат измерений вычисляется по формуле (12) (упражнение 3 выполнения работы).

4) **В режиме оценки объемной активности радионуклидов в пробах** необходимо также проведение двух измерений. Оба измерения проводятся с открытой задней крышкой, а прибор устанавливается на кювету. Первое измерение проводится с кюветой, заполненной чистой питьевой водой, второе – с кюветой, заполненной исследуемым веществом. Время измерения контролируется потребителем по секундомеру или часам. Результат измерений вычисляется по формуле:

$$A = K_n \left(\frac{N_{\phi+n}}{t_2} - \frac{N_{\phi}}{t_1} \right), \text{ Ки/л} \quad (11)$$

где N_{ϕ} – показания прибора при измерении с кюветой, заполненной водой; $N_{\phi+n}$ – показания прибора при измерении с исследуемым веществом; t_1 – время измерения с кюветой, заполненной водой ($t_1=10$ мин); t_2 – время измерения с кюветой, заполненной веществом ($t_2=10$ мин или 30 мин), K_n – коэффициент прибора (порядка $8 \cdot 10^{-9}$ Ки · мин / л · импульс).

Замечание: Для измерений с открытой задней крышкой прибора необходимо повернуть фиксатор (поз.10) и открыть заднюю крышку. При этом необходимо быть осторожным, чтобы не повредить тонкую пленку (поз. 2), которая закрывает счетчики прибора.

Подготовка дозиметра к работе

Прежде, чем приступить к выполнению работы, необходимо проверить его готовность к работе.

1. Включить прибор, для чего выключатель питания (поз.6) перевести в положение «ВКЛ». На цифровом табло должно индуцироваться: 0,000 или 0000. Включение прибора должно сопровождаться коротким звуковым сигналом. Если переключатель 3 находится в положении «МД», то после первого знака индуцируется точка, если переключатель 3 находится в положении «Т», то эта точка отсутствует.

2. Если прибор после включения выдает постоянный звуковой сигнал, то необходимо установить новый элемент питания.

3. Нужно убедиться в правильности работы электронной схемы пересчета и таймера прибора, для чего: перевести переключатель 3 в положение «МД», нажать кнопку «контроль» (поз. 4) и удерживать ее в нажатом положении до конца проведения контрольной проверки, а затем кратковременно нажать кнопку «пуск» (поз. 5). На числовом табло должны появиться три точки между числовыми знаками и начаться подсчет чисел. Через (20 ± 5) с подсчет чисел должен прекратиться, окончание подсчета должно сопровождаться коротким

звуковым сигналом, а на табло должно индуцироваться число **1,024**. После окончания подсчета отпустить кнопку «контроль».

4. Если при проведении контрольного теста индуцируемое число отличается от указанного выше, то следует считать прибор неисправным.

5. Для проверки работоспособности регулятора напряжения и счетчиков необходимо установить переключатель 3 в положение «МД» и нажать кнопку «пуск». После окончания измерения на табло должно индуцироваться число, близкое к **натуральному фону γ – излучения [(0,005–0,06) мР/ч]**. Если после измерения на табло индикатора зафиксировалось число 0,000 или число, меньшее 0,005, то необходимо считать прибор неисправным.

Выполнение работы

Упражнение 1. Работа дозиметра в режиме «Поиск».

1. Подготовить прибор к работе.
2. Проверить, закрыта ли задняя крышка прибора (поз. 9), при необходимости зафиксировать ее фиксатором (поз. 10).
3. Перевести переключатель 3 в положение «Т» (крайнее правое положение).
4. Включить прибор выключателем питания и кратковременно нажать на кнопку «пуск». Прибор начнет подсчет импульсов, число которых индуцируется на числовом табло. Через каждые десять импульсов прибор должен подавать звуковой сигнал.
5. При натуральном фоновом излучении прибор должен подавать 3–12 звуковых сигналов в минуту (30–120 импульсов в минуту). С увеличением мощности экспозиционной дозы γ – излучения пропорционально растет число звуковых сигналов за 1 минуту.
6. Измерьте с помощью прибора число импульсов за 1 мин (время измеряйте с помощью секундомера либо часов с секундной стрелкой).
7. Сделайте вывод

Упражнение 2. Измерение мощности экспозиционной (полевой эквивалентной) дозы гамма-излучения.

1. Подготовить прибор к работе.
2. Проверить, закрыта ли задняя крышка прибора, при необходимости закрыть ее.
3. Перевести переключатель 3 в положение «МД» (крайнее левое положение).
4. Включить прибор выключателем питания и нажать кнопку «пуск». При этом на числовом табло должны появиться точки после каждого разряда и начаться отсчет импульсов (0.0.0.0).
5. Через (20 ± 5) с измерение прекратится, что будет сопровождаться звуковым сигналом, а на числовом табло зафиксируется число с одной запятой, например: 0,012. Это показание прибора будет соответствовать **мощности экспозиционной дозы гамма-излучений, измеренной в мР/ч**. Показания на

числовом табло сохраняются до повторного нажатия на кнопку «пуск» или выключения прибора.

6. Для повторного измерения достаточно, не выключая прибор, кратковременно нажать кнопку «пуск».

7. После проведения измерений выключить прибор.

8. Необходимо помнить, что взаимодействие ионизирующих излучений с облучаемым объектом носит статистический характер (случайный), поэтому при малых значениях мощности экспозиционной дозы (на уровне натурального фона) могут наблюдаться значительные погрешности в показаниях прибора. Для получения более стабильных значений мощности экспозиционной дозы необходимо выполнить 3–5 измерений и вычислить ее среднее арифметическое значение. **Замечание:** натуральный фон γ – излучения на территории СНГ изменяется в широких пределах, и, как правило, составляет значение **от 0,005 до 0,06 мР/ч.**

9. При измерении мощности экспозиционной дозы, когда измеряемый результат может быть близок к верхнему пределу измерения прибора (10 мР/ч), необходимо на протяжении времени измерения визуально контролировать подсчет импульсов на числовом табло индикатора. Прибор не имеет сигнализации о переборе индикатора, а после переполнения четырех разрядов продолжается отсчет импульсов от нуля. В таких случаях повторить измерение, а если убедитесь в том, что случилось переполнение числового табло, необходимо срочно покинуть загрязненную зону, а о ее наличии и координатах сообщить в соответствующие государственные службы.

10. Измерьте мощность экспозиционной дозы (в мР/ч) стола, на котором вы сидите, халата и других предметов не менее 3 раз. Найдите средние значения. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

Объект	№ опыта	$P_{\text{экс.}}, \frac{мР}{ч}$	$\bar{P}_{\text{экс.}}, \frac{мР}{ч}$
1.	1		
	2		
	3		
2.	1		
	2		
	3		
3.	1		
	2		
	3		

11. Сделайте вывод

Упражнение 3. Измерение плотности потока бета-излучения с загрязненных поверхностей.

1. Подготовить прибор к работе.

2. Проверить, закрыта ли задняя крышка прибора, при необходимости плотно закрыть ее.

3. Перевести переключатель 3 в положение «МД» и включить прибор.

4. Положить дозиметр плоскостью задней крышки на источник β – излучения и кратковременно нажать кнопку «пуск». Измерить и записать показание прибора (N_γ).

5. Открыть заднюю крышку прибора.

6. Выполнить измерения с открытой крышкой прибора аналогично п. 4, записать показания прибора ($N_{\gamma+\beta}$).

7. Закрыть заднюю крышку прибора, выключить его.

8. Плотность потока β – лучей с поверхности вычислить по формуле (она указана на задней крышке прибора):

$$g = k_s (N_{\gamma+\beta} - N_\gamma), \quad (12)$$

где $N_{\gamma+\beta}$ – показания прибора с открытой задней крышкой **без учета запятой** на табло импульсов, N_γ – показания прибора с закрытой задней крышкой **без учета запятой** на табло импульсов.

Единица измерения $[g]$ – $1 \text{ част./см}^2 \cdot \text{мин}$.

Коэффициент отсчета прибора: $k_s = 0,5 \text{ част./см}^2 \cdot \text{мин} \cdot \text{импульс}$ (он указан на задней крышке прибора).

9. Сделайте вывод по полученному значению плотности потока β – лучей.

Упражнение 4. Оценка объемной активности радионуклидов в пробах.

1. Подготовить прибор к работе.

2. Перевести переключатель в положение «Т».

3. Открыть заднюю крышку прибора (поз.9) и установить его на кювету, заполненную чистой питьевой водой.

4. Фиксируя время измерения $t_1 = 10 \text{ мин}$ в данном случае, кратковременно нажав кнопку «пуск», снять и записать показание прибора (N_ϕ).

5. Установить прибор на кювету (с открытой задней крышкой), заполненную исследуемым веществом (пробой).

6. Фиксируя время измерения $t_2 = 10 \text{ мин}$ в данном случае, кратковременно нажав кнопку «пуск», снять и записать показание прибора ($N_{\phi+n}$).

7. Закрыть заднюю крышку прибора, выключить его.

8. Объемную активность радионуклидов в пробе вычислить по формуле (11).

9. Сделайте вывод, сравнив полученное значение объемной активности A_v со значением, приведенным в таблице 1 для данной пробы.

Контрольные вопросы

1. Что такое радиоактивность? Виды радиоактивности.
2. Охарактеризуйте α -, β -, γ -излучения. Сравните их проникающую и ионизирующую способности.
3. Запишите закон радиоактивного распада.
4. Что такое активность распада? Единицы ее измерения (Bk , Ku).
5. Дать определение плотности потока ионизирующих частиц.
6. Дать определение поглощенной дозы и единиц ее измерения ($Гр$, $рад$).
7. Дать определение экспозиционной дозы и единиц ее измерения ($Кл/кг$, R , $ФЭР$).
8. Что характеризует коэффициент качества ($кк$) ионизирующего излучения? Приведите средние значения $кк$ для разных видов излучения.
9. Дать определение эквивалентной дозы и единиц ее измерения ($Зв$, $бэр$).
10. Дать определение коэффициента радиационного риска (КРР) и эффективной эквивалентной дозы $D_{экр}$.
11. Что такое мощность дозы, единицы ее измерения для различных доз.
12. Устройство дозиметра-радиометра "Сосна".
13. Охарактеризовать четыре режима работы прибора.

Лабораторная работа № 14

Измерение времени соударения шаров.

Статистический метод оценки случайных погрешностей

Приборы и принадлежности: штатив, шары, электронный счетчик-секундомер.

Введение

Случайными называются погрешности, которые непредсказуемым образом меняют свой знак и величину от опыта к опыту. Они появляются вследствие несовершенства органов чувств (например, быстроты реакции), плохой повторяемости показаний приборов и многих других причин, которые не всегда можно учесть (движение окружающего воздуха, изменение температуры и т. п.). Увеличение числа измерений ведет к повышению точности результатов. Полностью устранить случайные погрешности невозможно, однако их можно оценить методами теории вероятностей, так как они подчиняются статистическим закономерностям.

Существует несколько способов оценки случайных погрешностей.

1. В простейшем случае указывается **предельная абсолютная погрешность** $\Delta x_{пр}$ – наибольшее отклонение результатов измерений от среднего арифметического. Например, если при измерении диаметра стержня

получены значения: 5,2 мм, 5,8 мм, 6,0 мм, 5,1 мм, 5,4 мм, то среднее значение диаметра $\bar{x} = 5,5$ мм, а $\Delta x_{\text{пр}} = 0,5$ мм (рис. 1). В результате $x = (5,5 \pm 0,5)$ мм с вероятностью $\alpha = 1$ (то есть, все измеренные значения попали в интервал $[\bar{x} - \Delta x_{\text{пр}}, \bar{x} + \Delta x_{\text{пр}}]$).

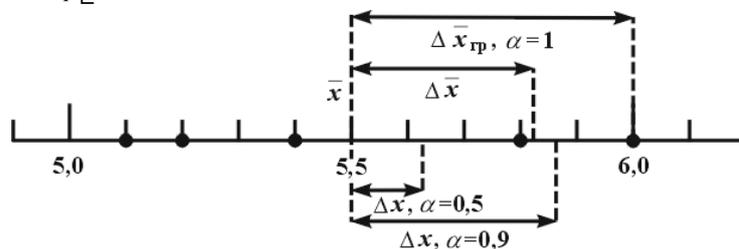


Рис. 1

Эта оценка является завышенной, так как показывает только границы области значений полученных ошибок, однако вследствие простоты часто применяется (например, для оценки погрешности отсчета электроизмерительных приборов).

2. Иногда находят **среднее арифметическое модулей погрешностей отдельных измерений**:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i| \quad (1)$$

При этом считается, что все ошибки имеют одинаковые знаки, что мало вероятно. Данный способ также дает завышенную погрешность и не позволяет определить надежность результата (возможность попадания x_i в интервал $[\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x]$).

Так, для рассмотренного примера $\overline{\Delta x} = 0,32$ мм, но, как видно из рис. 1, не все результаты попали в этот интервал. Вследствие своей простоты этот способ иногда применяется на практике.

3. Наиболее полную оценку случайных погрешностей дают **статистические методы**, основанные на законах распределения случайных величин.

При большом числе опытов самым распространенным законом, по которому распределяются случайные величины, является **закон распределения Гаусса**, или **нормальное распределение**. Для этого случайная величина x должна удовлетворять некоторым требованиям:

- принимать непрерывный ряд значений;
- одинаковые отклонения Δx данной величины от некоторого среднего значения \bar{x} как в одну, так и в другую сторону должны повторяться одинаково часто (быть равновероятными);
- с увеличением отклонения Δx частота (вероятность) ее появления уменьшается.

На рисунке 2 представлен типичный график такого распределения, где по оси абсцисс отложены значения случайной величины x , а по оси ординат -

плотность распределения $\varphi(x)$ случайной величины x , которая выражает вероятность $d\alpha$ ее попадания в бесконечно малый интервал $]x, x + dx[$:

$$d\alpha = \varphi(x)dx.$$

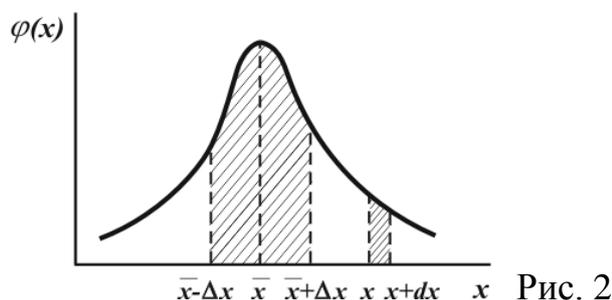


Рис. 2

Вероятность α попадания результата измерения x_i в интервал $]\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x[$ (а ошибки измерения Δx_i , соответственно, в интервал $]-\Delta x, +\Delta x[$) равна площади фигуры, ограниченной кривой $\varphi(x)$:

$$\alpha = \int_{\bar{x} - \Delta x}^{\bar{x} + \Delta x} \varphi(x)dx.$$

Эта вероятность называется **доверительной вероятностью** (или **надежностью**) результата, интервал $]\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x[$ – **доверительным интервалом**, а его полуширина Δx – **доверительной погрешностью** для данной α .

Возможный разброс значений среднего арифметического около истинного значения характеризуется его **стандартным отклонением**:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (1)$$

При большом числе измерений в качестве **доверительной погрешности** Δx берут σ , доверительная вероятность при этом $\alpha \approx 0,68$. С расширением интервала вероятность возрастает ($\alpha = 0,95$ при $\Delta x = 2\sigma$ и $\alpha = 0,997$ при $\Delta x = 3\sigma$).

Следует помнить, что **распределение Гаусса** справедливо только для **большого числа измерений**; при **небольшом** числе опытов ($3 \leq n \leq 20$) необходимо пользоваться **распределением Стьюдента**. В этом случае **доверительная погрешность** находится по формуле:

$$\Delta x = t_{\alpha n} \sigma, \quad (2)$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений n и доверительной вероятности α (**табл. I**).

Окончательный результат записывается в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \text{ с вероятностью } \alpha. \quad (4)$$

В нашем примере $\sigma = \sqrt{\frac{1}{5 \cdot 4} (0,3^2 + 0,3^2 + 0,5^2 + 0,4^2 + 0,1^2)} \approx 0,17$.

При невысокой надежности $\alpha = 0,5$ коэффициент $t_{\alpha n} = 0,74$ и интервал неширок ($\Delta x = 0,74 \cdot 0,17 \approx 0,13$ (мм)), однако многие результаты не укладываются в него. Для повышения надежности результатов необходимо расширить интервал: при $\alpha = 0,9$ – $\Delta x = 0,36$ мм, а при $\alpha = 0,98$ – $\Delta x = 0,63$. Все результаты попадают в этот интервал (в самом деле, **вероятность 0,98 означает, что 98 результатов из 100 должны попасть в указанный интервал**).

При большом числе измерений $n \geq 20$ распределение Стьюдента переходит в распределение Гаусса (при $n \rightarrow \infty$ коэффициент $t_{\alpha n} \rightarrow 1$, для вероятности $\alpha = 0,68$). **Предельная оценка погрешности** является частным случаем вероятностной при $\alpha = 1$.

При наличии случайных погрешностей с увеличением числа измерений доверительная погрешность уменьшается, так как стандартное отклонение σ и коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}$ для данной надежности α убывают.

Статистический метод позволяет также обнаружить и устранить **промахи** – т. е. **грубые ошибки**, вызванные чаще всего внезапной поломкой прибора или невнимательностью экспериментатора. Действительно, результаты, которые не попали в доверительный интервал при очень высокой вероятности (например, $\alpha = 0,99$), являются промахами. Если среди результатов измерений оказывается значение x_k , которое резко выделяется, то находят **коэффициент промаха**:

$$v = \frac{|\langle x \rangle - x_k|}{\sqrt{n} \cdot \sigma} \quad (3)$$

Если его значение окажется больше предельного для данного числа опытов $v > v_{\text{пр}}$ (табл. II), то этот результат должен быть отброшен и вычислены новые \bar{x} и σ .

Проверим, является ли промахом в рассмотренном примере результат $x = 6,0$ мм, который наиболее отличается от среднего арифметического $\bar{x} = 5,5$ мм. Для этого вычислим:

$$v = \frac{|5,5 - 6,0|}{\sqrt{5} \cdot 0,17} \approx 1,32$$

Как видно из таблицы II, этот результат промахом не является, так как $v < v_{\text{пр}} = 1,96$.

Таким образом, статистический метод позволяет:

- при заданном числе измерений n и надежности α оценить доверительную погрешность Δx ;
- при заданном числе измерений n и погрешности Δx определить доверительную вероятность (надежность) результата α ;
- определить необходимое число измерений для получения требуемых погрешности и надежности;

– обнаружить и устранить промахи.

Описание установки и метода

На штативе подвешены два металлических шара, соединенных при помощи тонких проводников с электронным счетчиком-секундомером, который состоит из генератора G и счетчика импульсов с числовой индикацией C (рис. 3).

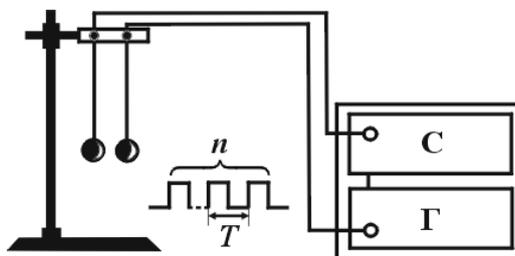


Рис. 3

Генератор посылает импульсы частотой ν . Счетчик подсчитывает количество n импульсов, которые проходят через замкнутую цепь за время соударения шаров. Таким образом:

$$\tau = nT = \frac{n}{\nu}, \quad (4)$$

где T – период следования импульсов. Пределы измерения времени зависят от частоты генератора (при $\nu = 100 \text{ Гц}$ одна единица счета соответствует $t_m = 10 \text{ мс}$, при $\nu = 100 \text{ кГц}$ $t_m = 10 \text{ мкс}$).

Выполнение работы

Электронным счетчиком-секундомером измерьте время соударения шаров t_i (не менее 20 раз).

Вычислите среднее арифметическое $\langle t \rangle$ по формуле:

$$\langle t \rangle = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где n – число измерений.

Найдите отклонения результатов отдельных измерений $\Delta t = \langle t \rangle - t_i$ и их квадраты.

Результаты запишите в таблицу:

i	$t_i, 10^{-5} \text{ с}$	$\Delta t_i, 10^{-5} \text{ с}$	$\Delta t_i^2, 10^{-10} \text{ с}^2$

Вычислите стандартное отклонение среднего арифметического σ по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\langle t \rangle - t_i)^2}.$$

Выбираем значение доверительной вероятности $\alpha = 0,5$. По таблице I найдите коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}$ для данного числа опытов $n = 20$.

Вычислите доверительную погрешность Δt по формуле: $\Delta t = t_{\alpha n} \cdot \sigma$.

Проделайте те же операции для двух значений доверительной вероятности α (0,9; 0,999).

Проделайте п.2 – п.8 для пяти измерений ($n = 5$) и для трех измерений ($n = 3$). Результаты времени соударений возьмите из таблицы (п.4).

Полученные результаты оформите в виде следующей таблицы:

n	$\langle t \rangle, 10^{-5} c$	σ	α	$t_{\alpha n}$	$\Delta t, 10^{-5} c$
20			0,5		
			0,9		
			0,999		
5			0,5		
			0,9		
			0,999		
3			0,5		
			0,9		
			0,999		

Сделайте вывод, в котором отразите: 1) зависимость доверительной погрешности от числа измерений при одном значении доверительной вероятности; 2) зависимость доверительной погрешности от доверительной вероятности при одном значении числа измерений.

Контрольные вопросы

1. Какие ошибки называются случайными?
2. Каков смысл плотности распределения случайной величины?
3. Какое распределение случайных погрешностей справедливо при большом числе измерений? При малом?
4. Что понимают под доверительной вероятностью? Доверительным интервалом? Доверительной погрешностью?
5. Как вычислить доверительную погрешность?
6. От чего зависит коэффициент Стьюдента?
7. Как обнаружить промахи?
8. В чем заключается принцип работы электронного счетчика-секундомера?
9. Какое минимальное время можно измерить электронным счетчиком-секундомером с частотой генератора 10 Гц? 1 кГц?

Таблица I

**Коэффициент Стьюдента
для доверительной вероятности α при n измерениях**

Число измерений n	Доверительная вероятность α							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,999
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	4,1
20	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,9
40	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	3,6
60	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	3,5
120	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	3,4
∞	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	3,3

Таблица II

**Коэффициенты $v_{\text{пред}}$ для установления промахов
с вероятностью 0,99 в серии из n измерений**

n	3	4	5	6	7	8	9	10	12	20	25
$v_{\text{пред}}$	1,41	1,72	1,96	2,13	2,27	2,37	2,46	2,54	2,80	2,96	3,07

При $n \geq 25$ можно считать $v_{\text{пред}} = 3,1$.

Литература

1. Лаврова И.В. Курс физики. М., 1981
2. Ливенцев Н.М. Курс физики. М., 1974
3. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами: Пер. с англ. М., 1986
4. Мікуліч А. С. Курс агульної фізики: Електричність і магнетизм. – Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М., 1977. Т.3

5. *В.А. Яковенко, Г.А. Заборовский, С.В. Яковенко.* Общая физика. Механика. Минск: РИВШ, 2008. – 320 с.

6. *С.А. Василевский, В.Н. Котло, И.А. Вабищевич.* Молекулярная физика и термодинамика. Минск: БГПУ, 2008. –192 с.

7. *О.М. Бояркин, А.Н.Макаревич, С.Н. Пастушонок, Г.Г. Бояркина.* Лабораторный практикум по физике. Минск. – 2002

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Вопросы к зачету по курсу «Физика»

1. Предмет физики и методы физических исследований. Материя и движение. Пространство и время – основные формы существования материи.

2. Связь физики с биологией, географией, химией. Физические процессы в организме.

3. Кинематика поступательного и вращательного движения. Основные понятия кинематики: материальная точка, траектория, система отсчета, путь, вектор перемещения.

4. Равномерное и равнопеременное прямолинейное движения.

5. Поступательное и вращательное движение тела.

6. Основные понятия и величины динамики. Законы Ньютона. Инерциальные системы отсчета.

7. Силы в механике: гравитационные, упругости, трения.

8. Неинерциальные системы отсчета и силы инерции. Центрифугирование. Сила Кориолиса.

9. Силы, действующие на мышцы и кости.

10. Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение.

11. Статика. Условия равновесия тела. Момент силы. Рычаг.

12. Силы, действующие на мышцы и кости. Суставы и рычаги в опорно-двигательном аппарате человека.

13. Работа силы. Мощность. Работа и мощность человека.

14. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения механической энергии. Энергетика бега.

15. Стационарное течение. Условие неразрывности струи.

15. Уравнение Бернулли и его применение. Измерение скорости потока. Расходомеры (трубка Вентури). Водоструйный насос.

17. Подъемная сила крыла. Аэрация почвы. Вязкость. Ньютоновские и неньютоновские жидкости.

18. Реология. Движение крови в сосудах. Физические принципы определения давления крови.

19. Колебания и волны. Основные характеристики колебательного движения. Гармонические колебания. Собственные и вынужденные колебания. Резонанс. Волновой процесс.

20. Природа звука. Инфра- и ультразвук. Природные источники инфразвука и ультразвука (землетрясение, шторм, цунами). Действие инфразвука и ультразвука на биологические объекты.

21. Объективные и субъективные характеристики звука. Физические основы речи и слуха человека. Фонокардиография. Аудиометрия.

22. Предмет молекулярной физики. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов и их экспериментальное подтверждение.

23. Идеальный газ. Параметры состояния. Уравнение состояния идеального газа. Основные газовые законы.

24. Реальный газ. Атмосфера. Испарение и конденсация. Влажность воздуха.

25. Барометрическая формула. Атмосфера как защитная оболочка Земли. Методы измерения влажности воздуха и атмосферного давления.

26. Первое и второе начала термодинамики. Обратимые, необратимые процессы.

27. Энтропия. Энтропия биологических систем. Энергетический баланс организма.

28. Биокалометрия. Скорость метаболизма у людей. Гипотермия и гипертермия.

29. Жидкости. Поверхностное натяжение. Формула Лапласа. Капиллярные явления и их роль в природе.

30. Диффузия в клетках и тканях. Физические вопросы строения и действия мембран. Растворы. Осмос.

31. Электрическое поле и его основные характеристики (напряженность, потенциал). Связь напряженности электрического поля и напряжения для однородного электрического поля.

32. Биопотенциалы. Сердце как электрический диполь. Основы электрокардиографии.

33. Действие электростатического поля на биологические объекты. Электростатическая защита. Заземление.

34. Электрический ток. Электрический ток в твердых веществах, жидкостях и газах. Закон Ома. Переменный ток.

35. Импеданс. Электропроводимость биологических тканей. Электрокинетические явления (электрофорез, электроосмос).

36. Действие электрического тока на живой организм. Плазма. Аэроионы.

37. Магнитное поле и его характеристики. Закон Ампера. Сила Лоренца. Электромагнитный счетчик скорости крови.

38. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Магнитные свойства вещества. Природа магнетизма.

39. Природа северного сияния. Магнитное поле Земли. Магнитные бури.

40. Действие магнитного поля на биологические системы. Физические основы магнитобиологии.

41. Электромагнитные колебания и волны. Шкала электромагнитных волн. Электромагнитная природа света.

42. Интерференция и дифракция света. Рентгеноструктурный анализ, голография и их использование.

43. Поляризация и дисперсия света. Поляриметрия. Исследование биологических систем в поляризованном свете.

44. Отражение и преломление света. Полное отражение света. Световоды и их использование в эндоскопии.

45. Тонкие линзы. Оптическая сила линз. Оптическая система глаза, ее недостатки, их исправление.

46. Лупа. Микроскоп. Специальные приемы оптической микроскопии.

47. Поглощение и рассеяние света. Рассеяние света в атмосфере. Фотокалориметрия.

48. Тепловое излучение тел. Закон Кирхгофа. Законы излучения абсолютно черного тела. Излучение Солнца.

49. Источники теплового излучения, применяемые для лечебных целей. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения.

50. Строение атомов и молекул. Постулаты Бора.

51. Рентгеновское излучение и его природа. Биологическое действие рентгеновского излучения. Рентгенодиагностика. Рентгенотерапия.

52. Радиоактивность. Виды радиоактивного излучения и его действие на биологические системы.

53. Поглощенная, экспозиционная и эквивалентная дозы и единицы их измерения. Защита от ионизирующего излучения.

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Литература

Основная:

1. Василевский С.А., Котло В.Н., Вабищевич И.А. Молекулярная физика и термодинамика. Курс лекций. – Мн., 2008.

2. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. М., "Высш. школа", 1996.

3. Грабовский Р.И. Курс физики. М., "Высш. школа" 1974, 1980, 1985, 2005.

4. Ливенцев Н.М. Курс физики М., "Высш. школа" 1974.

5. Мэриэн Д.Б. Общая физика с биологическими примерами. М., «Высшая школа», 1986.

6. Пастушонок С.Н., Новицкий О.А., Бояркина Г.Г. Лабораторный практикум по физике. Мн., 2011

7. Бондарь В.А., Ташлыков И.С., Яковенко В.А. и др. Общая физика. Практикум Мн., 2008.

Дополнительная:

1. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для мед.вузов. М., "Высш. школа", 1982.

2. Владимиров С.А., Рощупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.И. Биофизика. М., 1983.
3. Лаврова И.В. Курс физики. М., "Просвещение" 1981.
4. Мэрион Д.Б., Физика и физический мир, М., Мир, 1975

Электронные учебные ресурсы

1. А.М.Афонин. Физические основы механики.
<http://phys.bspu.unibel.by/lib/phys/bmstu/tom1/content.htm>
2. К.В.Глаголев, А.Н.Морозов. Физическая термодинамика
<http://phys.bspu.unibel.by/lib/phys/bmstu/tom2/content.htm>
3. А.М.Макаров, Л.А.Лунева. Основы электромагнетизма
<http://phys.bspu.unibel.by/lib/phys/bmstu/tom3/content.htm>
4. О.С.Литвинов, К.Б.Павлов, В.С.Горелик. Электромагнитные волны и оптика.
<http://phys.bspu.unibel.by/lib/phys/bmstu/tom4/content.htm>
5. Л.К.Мартинсон, Е.В.Смирнов. Квантовая теория.
<http://phys.bspu.unibel.by/lib/phys/bmstu/tom5/content.htm>
6. Б.Е.Винтайкин. Физика твердого тела.
<http://phys.bspu.unibel.by/lib/phys/bmstu/tom6/content.htm>

Электронное сопровождение лабораторных и самостоятельных работ

Название	Размещение
1.Изучение прямолинейного движение тел на машине Атвуда	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mex/1razd/new1_5.pdf
2.Изучение вращательного движения на приборе Обербека	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mex/1razd/new1_10.pdf
3.Определение ускорения силы тяжести при свободном падении тела	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mex/1razd/new1_7.pdf
4.Определение ускорения движения центра масс системы	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mex/1razd/new1_9.pdf
5.Определение скорости движения воздушного потока в трубке Вентурри	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mex/1razd/new1_16.pdf
6.Изучение основных законов идеального газа	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mol/2razd/new2_1.pdf
7.Исследование барометрической формулы	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mol/2razd/new2_6.pdf
8.Исследование распределения частиц в поле силы тяжести	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mol/2razd/new2_7.pdf
9.Определение молярной газовой постоянной	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mol/2razd/new2_3.pdf

10.Определение удельной теплоемкости жидкости	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mol/2razd/new2_10.pdf
11.Определение удельной теплоты перехода воды в пар при температуре кипения	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/mol/2razd/new2_11.pdf
12.Измерение индукции постоянного магнитного поля	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/elctr/3razd/new3_12.pdf
13.Изучение интерферометров	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/opt/4razd/new4_11.pdf
14.Определение длины волны при помощи зонной пластинки	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/opt/4razd/new4_12.pdf
15.Изучение дифракции света на узкой щели	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/opt/4razd/new4_13.pdf
16.Изучение дифракционной решетки	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/opt/4razd/new4_14.pdf
17.Изучение спектра атома водорода	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/kvant/5razd/new5_5.pdf
18. Изучение природной радиоактивности атмосферного воздуха	http://phys.bspu.unibel.by/um/phys/kvant/5razd/new5_11.pdf

**Перечень наглядных и других пособий,
методических материалов к техническим средствам,
используемым в учебном процессе**

Иллюстрационные материалы для учебного телевидения

1. Схемы, рисунки, таблицы

Иллюстрационные материалы для традиционных демонстраций

1. Микрометр, штангенциркуль	7. Оптическая скамья
2. Машина Атвуда	8. Камера Вильсона
3. Трубка Вентури	9. Тангенс-гальванометр
4. Вискозиметр, ореометр	10. Дифракционная решетка
5. Гигрометр, психометр	11. Дозиметр «Сосна
6. Амперметр, вольтметр	

**Методические рекомендации по организации
и выполнению самостоятельной работы**

Методика организации и проведения самостоятельной работы должна содействовать развитию индивидуально-творческих способностей каждого студента и приобретению ими навыков самостоятельного изучения учебного материала. Содержание и формы контролируемой самостоятельной работы студента разрабатываются в соответствии с целями и задачами подготовки специалистов.

Особое внимание необходимо обращать на организацию индивидуальной работы студента под руководством преподавателя. Эта работа должна проводиться с учетом индивидуальных особенностей каждого студента с помощью системы индивидуальных заданий, которые студент должен выполнять на основе образцов, рассмотренных на лекциях и практических занятиях.

Самостоятельная работа студента эффективна, если она протекает в форме делового взаимодействия: студент получает непосредственные указания, рекомендации преподавателя об организации и содержании самостоятельной деятельности, а преподаватель выполняет функцию управления через учет, контроль и коррекцию ошибочных действий. Рекомендуется регулярное проведение индивидуальных консультаций.

Учебно-тематический план дисциплины «Физика» для специальностей 01-02 04 01 Биология и химия, 01-02 04 02 Биология и география

№№	Наименование раздела, темы	Лекции	Лабораторные занятия	Семинарские занятия	Самостоятельная работа студентов
1	Элементы механики				
1.1	Введение. Кинематика поступательного и вращательного движения	2	4		12
1.1.1	Предмет физики и методы физических исследований. Материя и движение. Пространство и время – основные формы существования материи. Связь физики с биологией, географией, химией. Физические процессы в организме. Воздействие физических факторов на организм. Физические свойства и характеристики окружающей среды. Материальная точка. Виды движений и их основные характеристики. Перемещение, траектория, путь, скорость, ускорение. Скорость бега.	2			2
1.1.2	Введение. Кинематика поступательного и вращательного движения 1. Измерение линейных размеров, массы, тока, напряжения. Изучение электроизмерительных приборов.		4		2

	2.Изучение прямолинейного движения тел в поле силы тяжести на машине Атвуда. 3.Изучение вращательного движения на приборе Обербека				
1.2	Динамика движения	2			
1.2.1	Масса. Законы Ньютона. Силы в механике - гравитационные, упругости, трения, инерции. Силы, действующие на мышцы и кости. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета. Физические и биологические вопросы, связанные с неинерциальными системами отсчета. Силы, возникающие при криволинейном движении. Вращательное движение Земли и планет. Невесомость и перегрузки. Движение тела человека в условиях невесомости. Центрифугирование. Вестибулярный аппарат, как физическая инерциальная система отсчета. Искусственная гравитация. Сила Кориолиса. Момент силы. Рычаг. Суставы и рычаги в опорно-двигательном аппарате человека. Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение	2			2
1.3	Энергия, работа, мощность	2		2	
1.3.1	Работа силы. Консервативные и неконсервативные силы. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения энергии. Работа и мощность человека. Энергетика бега.	2			
1.3.2	Закон сохранения энергии			2	2
1.4	Основы гидро- и аэродинамики	2	4		4
1.4.1	Движение жидкостей и газов. Стационарное течение. Условие неразрывности струи. Уравнение Бернулли и его применение. Измерение скорости потока. Расходомеры (трубка Вентури). Водоструйный насос. Подъемная сила крыла. Аэрация почвы. Вязкость. Ньютоновские и неньютоновские	2			2

	жидкости. Реология. Движение крови в сосудах. Физические принципы определения давления и скорости движения крови.				
1.4.2	Основы гидро- и аэродинамики 1. Определение скорости движения воздушного потока в трубке Вентури. 2. Определение вязкости газов		4		2
1.5	Колебания и волны	2			
1.5.1	Основные характеристики колебательного движения. Гармонические колебания. Собственные и вынужденные колебания. Резонанс. Природа звука. Физические основы речи и слуха человека. Характеристики слухового ощущения и их связь с физическими характеристиками звука. Аудиометрия. Фонокардиография. Инфразвук и ультразвук. Природные источники инфразвука и ультразвука (землетрясение, шторм, цунами). Действие инфразвука и ультразвука на биологические объекты. Медико-биологическое использование ультразвука.	2			2
2	Элементы молекулярной физики				
2.1	Основные положения молекулярно-кинетической теории газов	2	4		4
2.1.1	Идеальный газ. Параметры состояния. Температура и методы ее измерения. Уравнение состояния (уравнение Менделеева-Клапейрона). Основные газовые законы. Реальный газ. Атмосфера. Испарение. Влажность воздуха. Барометрическая формула. Атмосфера как защитная оболочка Земли. Методы измерения влажности воздуха и атмосферного давления. Легочное дыхание.	2			
2.1.2	Основные положения молекулярно - кинетической теории газов 1. Изучение основных законов идеального газа 2. Исследование барометриче-		4		

	ской формулы 3. Исследование распределения частиц в поле силы тяжести				
2.2	Основы термодинамики	2	4		
2.2.1	Первое начало термодинамики. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики. Понятие энтропии. Энтропия биологических систем. Энергетический баланс организма. Скорость метаболизма у людей. Биокалориметрия. Гипотермия и гипертермия.	2			2
2.2.2	1. Определение показателя аддиабаты методом Клемана-Дезорма. 2. Определение среднего теплового коэффициента линейного расширения тел.		4		
2.3	Жидкости	2	4		
2.3.1	Поверхностное натяжение. Формула Лапласа. Капиллярные явления и их роль в природе. Диффузия. Диффузия в клетках и тканях. Физические вопросы строения и действия мембран. Растворы. Осмос.	2			2
2.3.2	Жидкости 1. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давлений		4		
3	Электродинамика				
3.1	Электрическое поле	2		2	4
3.1.1	Электрическое поле и его основные характеристики. Биопотенциалы. Электрический диполь. Сердце как электрический диполь. Основы электрокардиографии. Действие электростатического поля на биологические объекты. Электростатические явления в природе. Электростатическая защита. Заземление.	2			2
	Электрическое поле и его основные характеристики			2	2
3.2	Электрический ток	2			2
3.2.1	Электрический ток в твердых веществах, жидкостях и газах. Закон Ома. Переменный ток. Различные виды сопротивлений	2			2

	в цепи переменного тока. Импеданс. Электропроводимость биологических тканей. Электрокинетические явления (электрофорез, электроосмос). Действие электрического тока на живой организм. Ионизация молекул. Плазма и ее использование в химии. Аэроионы и их свойства.				
3.3	Магнитное поле	4	4		4
3.3.1	Основные характеристики магнитного поля. Действие магнитного поля на ток. Закон Ампера. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Электромагнитные счетчики скорости крови. Природа северного сияния.	2			2
3.3.2	Явление электромагнитной индукции. Трансформатор. Магнитные свойства вещества и их роль в открытии природных ископаемых. Природа магнетизма. Действие магнитного поля на биологические системы. Магнитное поле Земли. Магнитные бури. Физические основы магнитобиологии и магнитохимии	2			2
4	Оптика				
4.1	Волновая оптика	2	4		8
4.1.1	Монохроматический и сложный свет. Световой поток. Светочувствительность глаза. Интерференция и дифракция света. Дифракционная решетка. Рентгеноструктурный анализ и его использование. Понятие о голографии и ее использовании. Электромагнитные волны. Шкала электромагнитных волн. Электромагнитная природа света. Защита от электромагнитного излучения. Микроволновая терапия. Естественный и поляризованный свет. Оптически-активные вещества. Поляриметрия. Исследование биологических систем в поляризованном свете.	2			4
4.1.2	Интерференция и дифракция света		4		4

	1.Изучение интерферометров 2.Определение длины волны при помощи зонной пластинки 3.Изучение дифракции света на узкой щели 4.Изучение дифракционной решетки				
4.2	Геометрическая оптика	2			
4.2.1	Отражение и преломление света. Тонкие линзы. Оптическая сила линз. Недостатки линз. Оптическая система глаза. Недостатки оптической системы глаза и их исправление. Полное отражение света. Световоды и их использование в эндоскопии. Лупа. Микроскоп. Разрешающая способность и полезное увеличение оптических приборов. Специальные приемы оптической микроскопии.	2			
4.3	Взаимодействие света с веществом. Тепловое излучение	2			4
4.3.1	Поглощение и рассеяние света. Рассеяние света в атмосфере. Фотокалориметрия. Тепловое излучение тел. Закон Кирхгофа. Законы излучения абсолютно черного тела. Излучение Солнца. Источники теплового излучения, применяемые для лечебных целей. Теплоотдача организма. Понятие о термографии. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения.	2			4
5	Элементы квантовой физики				
5.1	Физика атомов и молекул	4			8
5.1.1	Строение атомов и молекул. Постулаты Бора. Гипотеза де-Бройля. Опыты по дифракции электронов. Волновая функция и ее статистический смысл. Корпускулярно-волновой дуализм. Фотон. Энергия, импульс, масса фотона. Спектры атомов. Излучение возбужденных атомов. Рентгеновское излучение и его природа. Биологическое действие рентгеновского излучения. Рентгенодиагностика. Рентгенотерапия. Лазеры и их использование в биологии, ме-	2			4

	дицине и географии. Понятие о нейтронографии. Электронография. Принцип работы электронного микроскопа				
5.2	Физика атомного ядра	2			
5.2.1	Строение атомного ядра. Нуклоны. Энергия связи нуклонов. Радиоактивность. Виды радиоактивного излучения. Действие радиоактивного излучения на биологические системы. Дозиметрия. Поглощенная, экспозиционная и эквивалентная доза. Защита от ионизирующего излучения. Миграция радиоактивных веществ в биосфере. Естественный радиоактивный фон. Техногенный фон. Использование радиоактивности в геологической разведке полезных ископаемых и для определения возраста пород. Счетчики ионизирующего излучения.	2			4
Итого:		62	24	4	46

Таблицы

1. Фундаментальные физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,807 \text{ м/с}^2$
Нормальное атмосферное давление	$p_0 = 101325 \text{ Па}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Объем 1 моля идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Универсальная (молярная) газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$
Постоянная Лошмидта	$L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4868 \cdot 10^{-4} \text{ а. е. м.}$

Масса покоя протона	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00728 а.е.м.
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00866 а.е.м.
Элементарный заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m} = 1,759 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Постоянная Фарадея	$F = 9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² К ⁴)
Постоянная Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$R = 1,1 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Радиус первой боровской орбиты	$r = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м
Атомная единица массы	1 а.е.м. = 1,660·10 ⁻²⁷ кг (соответствует энергии 931,5 МэВ)

2. Международная система единиц (СИ)

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	Русское
<i>Основные единицы</i>				
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд
<i>Дополнительные единицы</i>				
Плоский угол		радиан	rad	рад
Телесный угол		стерадиан	sr	ср

3. Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Выражение через основные и дополнительные единицы СИ
			Международное	Русское	
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц	с ⁻¹

Сила, вес	$LM T^{-2}$	ньютон	N	Н	$м \cdot кг \cdot с^{-2}$
Давление, механическое напряжение	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па	$м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	J	Дж	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}$
Мощность, поток энергии	$L^2 M T^{-3}$	ватт	W	Вт	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$
Количество электричества (электрический заряд)	TI	кулон	C	Кл	$с \cdot А$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	V	В	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	F	Ф	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^4 \cdot А^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	Ω	Ом	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	S	См	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^3 \cdot А^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Wb	Вб	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	T	Тл	$кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генри	H	Гн	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$
Световой поток	J	люмен	lm	лм	кд·ср
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	lx	лк	$м^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность нуклида в радиоактивном источнике	T^{-1}	беккерель	Bq	Бк	$с^{-1}$
Поглощенная доза излучения, керма, показатель поглощенной дозы	$L^2 T^{-2}$	грэй	Gy	Гр	$м^2 \cdot с^{-2}$

Примечание: Наименование всех единиц следует писать со строчной буквы, а обозначения единиц, наименования которых образованы по фамилиям ученых – с прописной.

Некоторые особенности применения стандарта «Метрология. Единицы физических величин»

Стандарт 1052–78 «Метрология. Единицы физических величин» утвержден в 1978 г. Стандарт устанавливает единицы физических величин, а

также наименования, обозначения и правила применения этих единиц. Некоторые наиболее отличительные особенности этого стандарта:

1. Обязательность применения единиц Международной системы единиц (СИ; СИ)*, а также десятичных кратных и дольных единиц от них.

Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и публикациях теоретического характера в области естествознания, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам (например, шкалам светочувствительных фотоматериалов).

2. Стандарт разрешает использовать наравне с единицами СИ без ограничения срока девять внесистемных единиц: тонну – для массы; минуту, час, сутки – для времени; угловые градус, минуту, секунду – для плоского угла; литр – для объема и вместимости; градус Цельсия – для температуры и разности температур.

В специальных областях разрешается использовать наряду с единицами СИ без ограничения срока десять внесистемных единиц: астрономическую единицу, световой год и парсек – в астрономии; атомную единицу массы – в атомной физике; гектар – в сельском и лесном хозяйствах; диоптрию – в оптике; град (гон) – в геодезии; электронвольт – в физике; вольт-ампер и вар – в электротехнике.

Разрешается применять четыре относительные единицы (единицу, процент, промилле, миллионную долю) и пять логарифмических единиц (бел, децибел, октаву, декаду, фон).

3. Учебный процесс (включая учебники и учебные пособия) во всех учебных заведениях должен быть основан на применении единиц СИ и единиц, допускаемых к применению.

4. В таблицах и тексте стандарта приводятся на первом месте международные обозначения единиц, а на втором – русские обозначения.

5. Буквенные обозначения единиц должны печататься прямым шрифтом. В обозначениях единиц точка как знак сокращения не ставится.

6. Обозначения единиц следует применять после числовых значений величин и помещать в строку с ними (без переноса на следующую строку).

Между последней цифрой числа и обозначением единицы следует оставлять пробел.

Правильно:

100 кВт

80 %

20 °С

Неправильно:

100кВт

80%

20°С; 20° С

Исключения составляют обозначения в виде знака, поднятого над строкой, перед которыми пробела не оставляют.

Правильно:

20°

Неправильно:

20 °

* Аббревиатура СИ читается и произносится отдельно (ЭС-И), а не вместе (СИ).

7. При указании значений величин с предельными отклонениям следует заключать числовые значения с предельными отклонениями в скобки и обозначения единицы помещать после скобок или проставлять обозначения единиц после числового значения величины и после ее предельного отклонения.

Правильно:	Неправильно:
(100,0±0,1) кг	100,0±0,1 кг
50 г ± 1 г	50±1 г

8. Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять точками на средней линии, как знаками умножения.

9. При применении косой черты обозначения единиц в числителе и знаменателе следует помещать в строку, произведение обозначений единиц в знаменателе следует заключать в скобки.

Правильно:	Неправильно:
м/с	м/с
Вт/(м·К)	Вт/м·К

10. Десятичные кратные и дольные единицы, а также их наименования и обозначения следует образовывать с помощью множителей и приставок, приведенных в таблице 4.

11. Выбор десятичной кратной или дольной единицы от единицы СИ диктуется прежде всего удобством ее применения. Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы с помощью приставок, выбирается единица, приводящая к числовым значениям величины, приемлемым на практике.

В принципе кратные и дольные единицы выбираются таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

12. Для снижения вероятности ошибок при расчетах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10.

4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение приставок	
		Международное	Русское
10^{18}	экса	E	Э
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д

10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	МК
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а

5. Латинский алфавит

Буква	Название	Буква	Название
Aa	А	Nn	Эн
Bb	Бэ	Oo	О
Cc	Цэ	Pp	Пэ
Dd	Дэ	Qq	Ку
Ee	Э	Rr	Эр
Ff	Эф	Ss	Эс
Gg	Же	Tt	Тэ
Hh	Аш	Uu	У
Ii	И	Vv	Вэ
Jj	Йот (жи)	Ww	Дубль-вэ
Kk	Ка	Xx	Икс
Ll	Эль	Yy	Игрек
Mm	Эм	Zz	Зэт

6. Греческий алфавит

Буква	Название	Буква	Название	Буква	Название
Αα	Альфа	Ιι	Йота	Ρρ	Ро
Ββ	Бета	Κκ	Каппа	Σσς	Сигма
Γγ	Гамма	Λλ	Ламбда	Ττ	Тау
Δδ	Дельта	Μμ	Мю	Υυ	Ипсилон
Εε	Эпсилон	Νν	Ню	Φφ	Фи
Ζζ	Дзэта	Ξξ	Кси	Χχ	Хи
Ηη	Эта	Οο	Омикрон	Ψψ	Пси
Θθϑ	Тэта	Ππ	Пи	Ωω	Омега