

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания по выполнению лабораторных работ
по дисциплине
ФИЗИКА**

Направление подготовки 19.03.03 Продукты питания животного происхождения
Направленность (профиль) Биоинженерия и технологии
Квалификация выпускника: бакалавр

Ставрополь, 2026

Введение

Актуальность учебной дисциплины «Физика» обусловлена необходимостью формирования у будущих специалистов теоретико-методологических компетенций, практических умений на которых базируется их профессиональная деятельность. В современных условиях важнейшим элементом подготовки бакалавров является формирование у них самостоятельности и культуры научного мышления, способности вести научную и профессиональную деятельность, навыков постановки целей, задач при решении проблемных ситуаций.

Целью лабораторных занятий является формирование профессиональных компетенций бакалавра по направлению подготовки 19.03.03 Продукты питания животного происхождения, связанных с приобретением знаний о методах научного познания природы; о современной физической картине мира; свойствах вещества и поля; об основах фундаментальных физических теорий; пространственно-временных закономерностях; динамических и статистических законах природы; элементарных частицах и фундаментальных взаимодействиях; строении и эволюции Вселенной.

Основные задачи дисциплины:

- овладение умениями проводить наблюдения, планировать и выполнять эксперименты, обрабатывать результаты экспериментов, применять теоретические знания при решении задач;
- развитие творческих способностей в процессе решения физических задач, выполнении экспериментальных заданий, подготовки рефератов, докладов;
- воспитание убежденности о необходимости разумного использования достижений науки и технологий для дальнейшего развития общества; отношения к физике как элементу общечеловеческой культуры;
- применение знаний по физике для объяснения явлений природы, принципов работы технических устройств, самостоятельного приобретения знаний, использования современных информационных технологий для поиска, переработки и представления информации по физике;
- использования приобретенных знаний и умений для решения задач, возникающих в профессиональной деятельности.

В результате изучения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции (в соответствии с образовательным стандартом):

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-2 Способен применять основные законы и методы исследований естественных наук для решения задач профессиональной деятельности	ИД-1 ОПК-2 Применяет законы и методы научного исследования для решения задач профессиональной деятельности	Готовность применять законы и методы научного исследования для решения задач профессиональной деятельности
	ИД-2 ОПК-2 Объясняет, описывает и интерпретирует решение учебных и профессиональных задач на	Готовность объяснять, описывать и интерпретировать решение учебных и профессиональных задач на основе имеющихся научных знаний, уметь

	основе имеющихся научных знаний, умеет прогнозировать характер протекания технологических процессов на основе имеющихся научных данных	прогнозировать характер протекания технологических процессов на основе имеющихся научных данных
--	--	---

Лабораторная работа 1

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ВОЗДУШНОЙ ДОРОЖКЕ

Цель работы – экспериментальная проверка основных уравнений и законов поступательного движения тела на специально сконструированной для этого лабораторной установке – воздушной дорожке.

Оборудование и материалы: воздушная дорожка с ползуном и набором аксессуаров, секундомер с 4 измерительными датчиками, набор грузов известной массы, набор перегрузков, весы

Теория

Любое физическое явление или процесс в окружающем нас материальном мире представляет собой закономерный ряд изменений, происходящих во времени и пространстве. Механическое движение, то есть изменение положения данного тела (или его частей) относительно других тел, – это простейший вид физического процесса. Механическое движение тел изучается в разделе физики, который называется механикой. Основная задача механики – определить положение тела в любой момент времени.

Одна из основных частей механики, которая называется **кинематикой**, рассматривает движение тел без выяснения причин этого движения. Кинематика отвечает на вопрос: как движется тело?

При поступательном движении тела все точки тела движутся одинаково, и, вместо того чтобы рассматривать движение каждой точки тела, можно рассматривать движение только одной его точки.

Основные характеристики движения материальной точки: траектория движения, перемещение точки, пройденный ею путь, координаты, скорость и ускорение.

Линию, по которой движется материальная точка в пространстве, называют траекторией.

Перемещением материальной точки за некоторый промежуток времени называется вектор перемещения $\vec{\Delta r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, направленный от положения точки в начальный момент времени к ее положению в конечный момент (рис. 1).

Скорость материальной точки представляет собой вектор, характеризующий направление и быстроту перемещения материальной точки относительно тела отсчета. Вектор ускорения характеризует быстроту и направление изменения скорости материальной точки относительно тела отсчета.

Равномерным прямолинейным движением называется такое прямолинейное движение, при котором материальная точка (тело) движется по прямой и в любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Вектор скорости равномерного прямолинейного движения материальной точки направлен вдоль ее траектории в сторону движения. Вектор скорости при равномерном прямолинейном движении равен вектору перемещения за любой промежуток времени, поделенному на этот промежуток времени:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Движение, при котором за равные промежутки времени тело совершает неравные перемещения называют неравномерным или переменным. Средней скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ называется величина, равная отношению перемещения тела $\Delta \vec{r}$ за некоторый промежуток времени Δt к этому промежутку:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Модуль средней скорости определяется как отношение пути ΔS , пройденного телом за некоторый промежуток времени, к этому промежутку:

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Направление вектора средней скорости $\langle \vec{v} \rangle$ совпадает с направлением $\Delta \vec{r}$ (рис. 2).

При неограниченном уменьшении Δt , $\langle \vec{v} \rangle$ стремится к предельному значению, которое называется мгновенной скоростью. Итак, мгновенная скорость $\vec{v}$ есть предел, к которому стремится средняя скорость $\langle \vec{v} \rangle$, когда промежуток времени движения стремится к нулю:

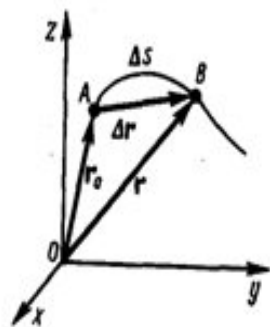


Рис. 1

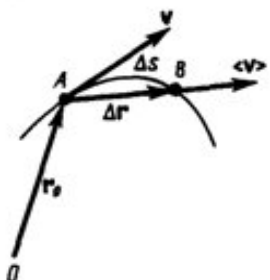


Рис. 2

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Из курса математики известно, что предел отношения приращения функции к приращению аргумента, когда последний стремится к нулю представляет собой первую производную этой функции по данному аргументу. Поэтому:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Мгновенная скорость $\vec{v}$ есть векторная величина, равная первой производной радиуса-вектора движущейся точки по времени. Так как секущая в пределе совпадает с касательной, то вектор скорости $\vec{v}$ направлен по касательной к траектории в сторону движения (рис. 2).

При неравномерном движении тела его скорость непрерывно изменяется. Как быстро изменяется скорость тела, показывает величина, которая называется ускорением. Средним ускорением неравномерного движения в интервале от t до $t + \Delta t$ называется векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к интервалу времени Δt :

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Мгновенным ускорением $\vec{a}$ в момент времени t будет предел среднего ускорения:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Таким образом, ускорение есть векторная величина, равная первой производной скорости по времени.

Согласно второму закону Ньютона, описывающего движение материальной точки массой m под действием силы $\vec{F}$ имеет следующий вид:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1)$$

где $\vec{a} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$ – ускорение тела.

В случае когда сила постоянна, решение уравнения (1) имеет вид:

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

где $\vec{r}_0$ и $\vec{v}_0$ – радиус-вектор и скорость тела в момент времени $t=0$.

В настоящей работе исследуется движение тела массой M (ползуна), движущегося по горизонтальной поверхности под действием силы натяжения нити, перекинутой через блок, к концу которой привязан груз массой m (см. рис.3).

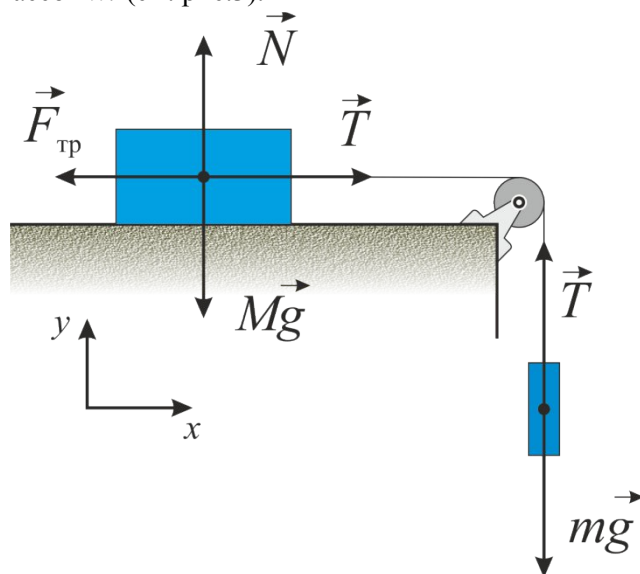


Рис. 3

При движении системы тел (груза и ползуна) связанных нитью, на груз действует сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{T}$ его ускорение направлено вертикально вниз по оси y . На ползун действует сила тяжести $M\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$, сила натяжения нити $\vec{T}$ и сила трения скольжения $\vec{F}_{тр}$. При движении ползуна на воздушной подушке сила трения скольжения сводится к минимуму, и ей можно пренебречь, по сравнению с другими силами.

Если нить считать нерастяжимой, то модули ускорений ползуна и груза будут равны. Так как масса блока, нити и сила трения в блоке малы по сравнению с массами ползуна и груза, модули сил натяжения нити будут одинаковы.

Выберем систему координат, как показано на рис.3. тогда второй закон Ньютона для груза в проекции на ось y имеет вид:

$$T - mg = -ma \quad (3)$$

а для ползуна в проекции на ось x

$$T = Ma \quad (4)$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$a = \frac{m}{m+M} \quad (5)$$

Стартовая система установлена таким образом, что спусковое устройство спускает ползун, не сообщая ему начальной скорости. В этом случае система уравнений будет иметь вид:

$$v = at \quad (6)$$

$$S = \frac{at^2}{2} \quad (7)$$

где $S = x - x_0$, x_0 – координата в точке пуска.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис.4. она состоит из трека 1, в котором есть отверстия для создания воздушной подушки. Воздух в трек поступает через воздуховод 2. Ползун 3 соединен с грузом 4 нитью перекинутой через блок 5. Для запуска ползуна служит стартовая система 6, а для его остановки - передвинутый в упор 7. Время движения ползуна измеряется электронным секундомером 8, к которому присоединены фотодатчики 9-12.

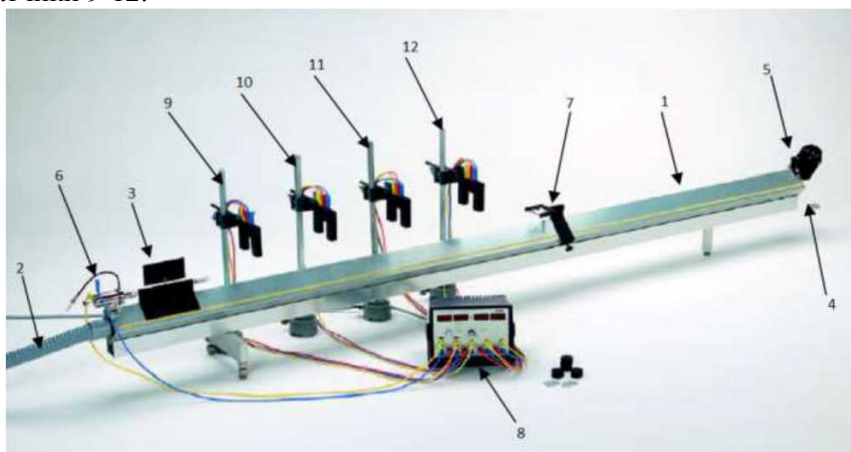


Рис.4. Экспериментальная установка для изучения равноускоренного движения

Масса ползуна может регулироваться при помощи гирь, которые надеваются на прикрепленные к нему с обеих сторон стержни. Оба стержня следует нагружать одинаково. Силу натяжения нити, действующую на ползун, можно изменять, вешая дополнительные гири на держатель.

Для взведения стартовой системы следует нажать на её стержень со стороны ползуна до упора. Излишних усилий прилагать не нужно. Запуск ползуна осуществляется нажатием на кнопку расположенную на гибком тросике стартовой системы.

Проведение эксперимента

Задание. Исследование зависимости пройденного пути и скорости ползуна от времени.

1. Расположить весы горизонтально поверхности, снять защитную крышку, включить их с помощью кнопки on/off.
2. В отсутствии груза весы должны показывать ноль. Аккуратно положить ползун без добавочных грузов на весы, и зафиксировать его массу M_0 . Таким же образом измерить массу держателя грузов m_0 .
3. Поставьте ползун на трек в точке запуска, зафиксировав его в начальном положении нажатием на стержень стартовой системы. Определите по шкале, нанесенной на трек, координату переднего края экрана ползуна в точке пуска x_0 , а также координаты фотодатчиков $x_1, \dots, x_n$.
4. Расположите четыре световых барьера таким образом, чтобы они разделяли измеряемое расстояние на отрезки примерно равной длины. Например: $S_1 = x_1 - x_0 = 20$ см, $S_2 = x_2 - x_0 = 40$ см, $S_3 = x_3 - x_0 = 60$ см, $S_4 = x_4 - x_0 = 80$ см. Последний барьер расположите так, чтобы ползун с экраном проходил под ним перед тем, как ускоряющаяся гиря коснется пола. Расположите переставной упор с вилкой и гнездом на треке таким образом, чтобы ползун легко ударялся о резиновую ленту перед тем, как ускоряющаяся гиря коснется пола. Проведите все последующие измерения, не изменяя положения световых барьеров.
5. Включите секундомер. Нажав кнопку «Mode» один раз, перевести его в режим измерения времени (), при этом загорится лампочка у пиктограммы этого режима. Нажать два раза кнопку «Reset».
6. Перекинуть нить через блок. Нажав кнопку на тросике стартовой системы, освободить ползун. Медленно передвигая ползун вдоль трека, убедиться, что он может беспрепятственно достигнуть фотодатчиков, а

держатель груза не достаёт до пола. Убедиться также в том, что световые датчики фиксируют моменты прохождения мимо них переднего края экрана.

7. Включить воздуходувку нажатием кнопки на её задней панели. Медленно повернуть ручку мощности наддува до положения 2. Подождать несколько секунд, после чего медленно повернуть ручку до положения 4.
8. С помощью гирь установить массу груза $m=10$ г и массу ползуна $M = 210$ г. Перед запуском закрепить ползун в стартовом положении, сбросить показания секундомера, нажав кнопку «Reset». Убедившись, что ползун и груз покоятся, нажать кнопку на тросике стартовой системы и запустить ползун. После прекращения движения снять показания секундомера t_1, t_2, t_3, t_4 . Повторить измерения четыре раза. Результаты измерений занести в таблицу отчета.
9. Постройте график зависимости пройденного пути от времени t .
10. Рассчитайте средние скорости на каждом отрезке по формуле $\langle v \rangle = \frac{S_i}{\langle t \rangle_i}$.
11. Результаты занести в таблицу отчета.
12. Для равноускоренного движения эти скорости равны соответствующим мгновенным скоростям $v(t)$ на этих участках в моменты времени

$$t = t_i \quad (9)$$

13. Построить график зависимости мгновенной скорости v от времени t . Убедиться, что это зависимость линейная.
14. По наклону этого графика определить ускорение системы $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$, и сравнить его с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (5).

Контрольные вопросы.

1. Что называется радиус-вектором, скоростью, ускорением материальной точки?
2. Приведите примеры движения тела под действием постоянной силы. Какова в общем случае форма его траектории и почему?
3. Как зависит координата от времени при движении с постоянным ускорением?
4. Как зависит скорость от времени при движении с постоянным ускорением?
5. Как будет зависеть ускорение линейно зависеть от массы груза при фиксированной массе ползуна?
6. Почему средняя скорость при равноускоренном движении на участке пути ΔS равна мгновенной скорости в момент времени $t = \frac{\Delta t}{2}$, где Δt - время движения на этом участке пути?

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ВОЗДУШНОЙ ДОРОЖКЕ

Цель работы – экспериментальная проверка основных уравнений и законов поступательного движения тела на специально сконструированной для этого лабораторной установке – воздушной дорожке.

Оборудование и материалы: воздушная дорожка с ползуном и набором аксессуаров, секундомер с 4 измерительными датчиками, набор грузов известной массы, набор перегрузков, весы

Теория

Любое физическое явление или процесс в окружающем нас материальном мире представляет собой закономерный ряд изменений, происходящих во времени и пространстве. Механическое движение, то есть изменение положения данного тела (или его частей) относительно других тел, – это простейший вид физического процесса. Механическое движение тел изучается в разделе физики, который называется механикой. Основная задача механики – определить положение тела в любой момент времени.

Часть механики, в которой изучаются причины, вызвавшие движение, называется динамикой. Динамика отвечает на вопрос: почему тело движется именно так, а не иначе? В основу динамики взяты три закона Ньютона.

Первый закон Ньютона.

Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют другие тела, или действия других тел компенсируются; эти системы отсчета называются инерциальными. Не все системы отсчета являются инерциальными.

Если система отсчета является инерциальной, то любая другая система отсчета, движущаяся относительно нее равномерно и прямолинейно, также инерциальна. Системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы с ускорением, являются неинерциальными.

Принцип относительности Галилея: во всех инерциальных системах отсчета при одинаковых начальных условиях все механические явления протекают одинаково.

Инерция – это явление сохранения скорости тела. Поэтому первый закон Ньютона называют законом инерции.

Инертность – это свойство тела, заключающееся в его способности сохранять скорость. Более инертными являются тела, которые медленнее изменяют свою скорость. Мерой инертности является масса.

Масса тела – физическая величина, количественно характеризующая инертность тела.

Сила – это количественная мера взаимодействия тел. Сила является причиной изменения скорости тела. В механике Ньютона силы могут иметь различную физическую природу: сила трения, сила тяжести, упругая сила и т.д. Сила является векторной величиной. Векторная сумма всех сил, действующих на тело, называется равнодействующей силой.

Согласно второму закону Ньютона, описывающего движение материальной точки массой m под действием силы $\vec{F}$ имеет следующий вид:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1)$$

где $\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$ – ускорение тела.

Если равнодействующая сила равна нулю, то тело будет оставаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Таким образом, формально второй закон Ньютона включает как частный случай первый закон Ньютона, однако первый закон Ньютона имеет более глубокое физическое содержание – он постулирует существование инерциальных систем отсчета.

Согласно третьему закону Ньютона, тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad (1)$$

Силы, возникающие при взаимодействии тел, всегда имеют одинаковую природу. Они приложены к разным телам и поэтому не могут уравновешивать друг друга. Складывать по правилам векторного сложения можно только силы, приложенные к одному телу.

В случае когда сила постоянна, решение уравнения (1) имеет вид:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t; \quad \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \quad (2)$$

где $\vec{r}_0$ и $\vec{v}_0$ – радиус-вектор и скорость тела в момент времени $t=0$.

В настоящей работе исследуется движение тела массой M (ползуна), движущегося по горизонтальной поверхности под действием силы натяжения нити, перекинутой через блок, к концу которой привязан груз массой m (см. рис.1).

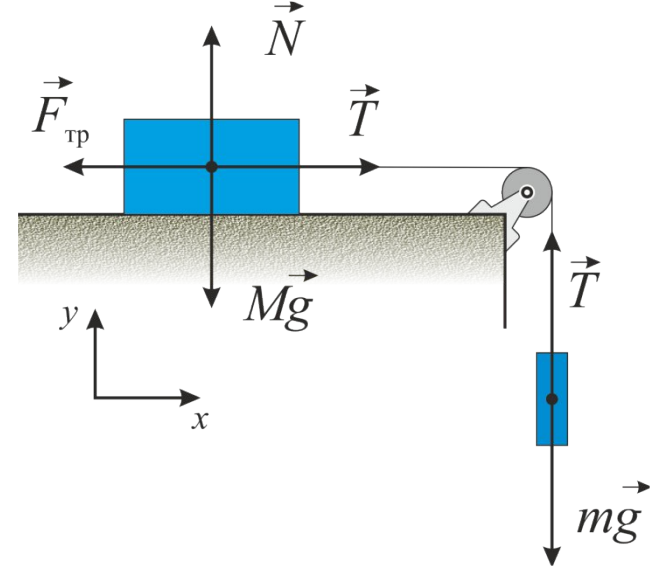


Рис. 1

на ось y имеет вид:

а для ползуна в проекции на ось x

Решая эту систему уравнений, получим

Стартовая система установлена таким образом, что спусковое устройство спускает ползун, не сообщая ему начальной скорости. В этом случае система уравнений будет иметь вид:

$$v = at \tag{6}$$

$$S = \frac{at^2}{2} \tag{7}$$

где $S = x - x_0$, x_0 – координата в точке пуска.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. она состоит из трека 1, в котором есть отверстия для создания воздушной подушки. Воздух в трек поступает через воздуховод 2. Ползун 3 соединен с грузом 4 нитью перекинутой через блок 5. Для запуска ползуна служит стартовая система 6, а для его остановки - передвинутый в упор 7. Время движения ползуна измеряется электронным секундомером 8, к которому присоединены фотодатчики 9-12.

При движении системы тел (груза и ползуна) связанных нитью, на груз действует сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{T}$ его ускорение направленно вертикально вниз по оси y . На ползун действует сила тяжести $M\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$, сила натяжения нити $\vec{T}$ и сила трения скольжения $\vec{F}_{тр}$. При движении ползуна на воздушной подушке сила трения скольжения сводится к минимуму, и ей можно пренебречь, по сравнению с другими силами.

Если нить считать нерастяжимой, то модули ускорений ползуна и груза будут равны. Так как масса блока, нити и сила трения в блоке малы по сравнению с массами ползуна и груза, модули сил натяжения нити будут одинаковы.

Выберем систему координат, как показано на рис.1. тогда второй закон Ньютона для груза в проекции

$$T - mg = -ma \tag{3}$$

$$T = Ma \tag{4}$$

$$-a = \frac{m}{m+M}g \tag{5}$$

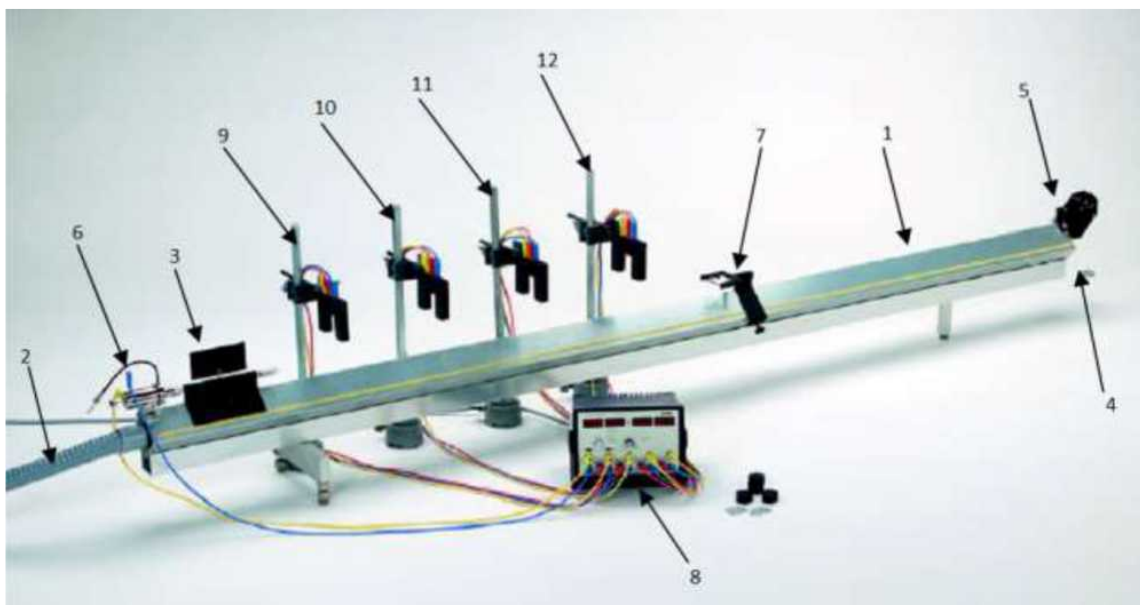


Рис.2. Экспериментальная установка для изучения равноускоренного движения

Масса ползуна может регулироваться при помощи гирь, которые надеваются на прикрепленные к нему с обеих сторон стержни. Оба стержня следует нагружать одинаково. Силу натяжения нити, действующую на ползун, можно изменять, вешая дополнительные гири на держатель.

Для взведения стартовой системы следует нажать на её стержень со стороны ползуна до упора. Излишних усилий прилагать не нужно. Запуск ползуна осуществляется нажатием на кнопку расположенную на гибком тросике стартовой системы.

Проведение эксперимента

Задание 1. Исследование зависимости ускорения ползуна от массы груза m при постоянной суммарной массе $M + m$.

1. Расположить весы горизонтально поверхности, снять защитную крышку, включить их с помощью кнопки on/off.
2. В отсутствии груза весы должны показывать ноль. Аккуратно положить ползун без добавочных грузов на весы, и зафиксировать его массу M_0 . Таким же образом измерить массу держателя грузов m_0 .
3. Поставьте ползун на трек в точке запуска, зафиксировав его в начальном положении нажатием на стержень стартовой системы. Определите по шкале, нанесенной на трек, координату переднего края экрана ползуна в точке пуска x_0 , а также координаты фотодатчиков $x_1, \dots, x_n$.
4. Расположите четыре световых барьера таким образом, чтобы они разделяли измеряемое расстояние на отрезки примерно равной длины. Например: $S_1 = x_1 - x_0 = 20$ см, $S_2 = x_2 - x_0 = 40$ см, $S_3 = x_3 - x_0 = 60$ см, $S_4 = x_4 - x_0 = 80$ см. Последний барьер расположите так, чтобы ползун с экраном проходил под ним перед тем, как ускоряющаяся гиря коснется пола. Расположите переставной упор с вилкой и гнездом на треке таким образом, чтобы ползун легко ударялся о резиновую ленту перед тем, как ускоряющаяся гиря коснется пола. Проведите все последующие измерения, не изменяя положения световых барьеров.
5. Включить секундомер. Нажав кнопку «Mode» один раз, перевести его в режим измерения времени (), при этом загорится лампочка у пиктограммы этого режима. Нажать два раза кнопку «Reset».
6. Перекинуть нить через блок. Нажав кнопку на тросике стартовой системы, освободить ползун. Медленно передвигая ползун вдоль трека, убедиться, что он может беспрепятственно достигнуть фотодатчиков, а держатель груза не достает до пола. Убедиться также в том, что световые датчики фиксируют моменты прохождения мимо них переднего края экрана.
7. Включить воздуходувку нажатием кнопки на её задней панели. Медленно повернуть ручку мощности надува до положения 2. Подождать несколько секунд, после чего медленно повернуть ручку до положения 4 или 5.
8. С помощью гирь установить массу груза $m = 8$ г и массу ползуна с дополнительными гирями $M = 320$ г. Перед запуском закрепить ползун в стартовом положении, сбросить показания секундомера, нажав кнопку «Reset». Убедившись, что ползун и груз покоятся, нажать кнопку на тросике стартовой системы и запустить ползун. После прекращения движения снять показания секундомера t_1, t_2, t_3, t_4 . Повторить измерения четыре раза. Результаты измерений занести в таблицу 1.

9. Повторить измерения для масс груза в диапазоне от 8 г до 16 г с шагом в 2 г. При этом нужно переносить гири ползуна на подставку груза, так чтобы суммарная масса $M+m=328$ г оставалась неизменной. Результаты занести в таблицу 1.
10. Рассчитать ускорение на каждом отрезке пути по формуле (см.(7)):

$$a_i = \frac{2S_i}{t_i^2} \quad (10)$$

и определить среднее значение ускорения для каждой массы m .

11. Построить график зависимости ускорения от массы груза m . Убедиться, что эта зависимость является линейной.

Задание 2. Исследование зависимости ускорения от суммарной массы ползуна и груза при постоянной массе груза.

1. С помощью гирь установить массу груза $m=10$ г и суммарную массу ползуна и груза $M + m = 210$ г.
2. Прodelать измерения времен t_1, t_2, t_3, t_4 . Результаты измерений занести в таблицу 2.
3. Повторить измерения для масс $M + m$ в диапазоне от 210 г до 330 г с шагом 30 г. Результаты занести в таблицу 2.
4. Определить ускорение на каждом участке пути по формуле (10), и определить среднее ускорение для каждой массы $M + m$.
5. Построить график зависимости ускорения от обратной массы $\frac{1}{M+m}$. Убедиться, что зависимость является линейной (см.(5)).
6. По наклону прямой графика зависимости a от $\frac{1}{M+m}$ определить ускорение свободного падения (см.(5))

$$g = \frac{1}{m} \frac{\Delta a}{\Delta \left(\frac{1}{M+m} \right)}$$

7. Сравнить полученное значение с табличным. Сделать выводы.

Контрольные вопросы.

1. Какая система отсчета называется инерциальной? неинерциальной?
2. Сформулируйте первый закон Ньютона.
3. Что собой представляют свойства симметрии пространства и времени?
4. Что называется силой? массой? Как они вводятся в физику?
5. Сформулируйте второй закон Ньютона.
6. Сформулируйте третий закон Ньютона.
7. Как ставится основная задача динамики материальной точки?
8. Опишите экспериментальную установку и методику проведения эксперимента.
9. При каком условии силы натяжения нити по разные стороны блока можно считать одинаковыми?
10. При каком условии можно пренебречь моментом инерции блока машины, не допуская большой ошибки в расчете ускорения тел системы?

Лабораторная работа 3

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: Изучение основных закономерностей колебательного движения математического маятника.

Идея эксперимента

Колебательным движением механической системы называется периодическое движение системы в окрестности положения равновесия.

Время T , за которое совершается одно полное колебание, называется периодом колебаний. Величина ν , обратная периоду, называется частотой колебаний $\nu = 1/T$, а величина $\omega = 2\pi\nu$ – циклической частотой.

В настоящей лабораторной работе изучаются колебания математического маятника.

В эксперименте исследуется колебательное движение груза, подвешенного на длинной нити. Соотношение его элементов таково, что этот физический маятник с достаточной степенью точности может считаться моделью математического маятника.

Теория

Маятник – тело, совершающее колебательное движение под действием квазиупругой силы. Если подвес нерастяжим, размеры груза пренебрежимо малы по сравнению с длиной подвеса и масса нити пренебрежимо мала по сравнению с массой груза, то груз можно рассматривать как материальную точку, находящуюся на неизменном расстоянии l от точки подвеса O . Такой маятник называется *математическим*.

На маятник действуют силы: натяжения нити $\vec{T}$ и тяжести $m\vec{g}$, которые в положении равновесия компенсируют друг друга $\vec{R} = \vec{T} + m\vec{g} = 0$. Для возбуждения колебаний маятник выводят из положения равновесия (рис.1). Теперь $\vec{R} \neq 0$ и маятник обладает избыточной потенциальной энергией mgh по отношению к положению равновесия. Эта энергия обуславливает колебание, происходящее по окружности и описываемое основным уравнением динамики вращательного движения:

$$\vec{M} = I\vec{\epsilon}, \quad (1)$$

где $\vec{M}$ – результирующий вращающий момент, $\vec{\epsilon}$ – ускорение, $I = ml^2$ – момент инерции шарика относительно OO^ϵ , проходящей через точку подвеса O , перпендикулярно плоскости колебаний (плоскости чертежа). Результирующий момент силы натяжения нити и силы тяжести равен

$$\vec{M} = \vec{M}_T + \vec{M}_g$$

Тогда

$$\vec{I\epsilon} = \vec{M}_T + \vec{M}_g$$

Угол $\vec{\varphi}$ – вектор, направленный от читателя вглубь, так как отсчет угла ведется по часовой стрелке. Векторы $\vec{\epsilon}, \vec{M}_T, \vec{M}_g$ направлены по оси вращения.

Спроецируем выражение (3) на ось OO^ϵ . Примем за положительное направление оси направление вектора $\vec{\varphi}$. Тогда

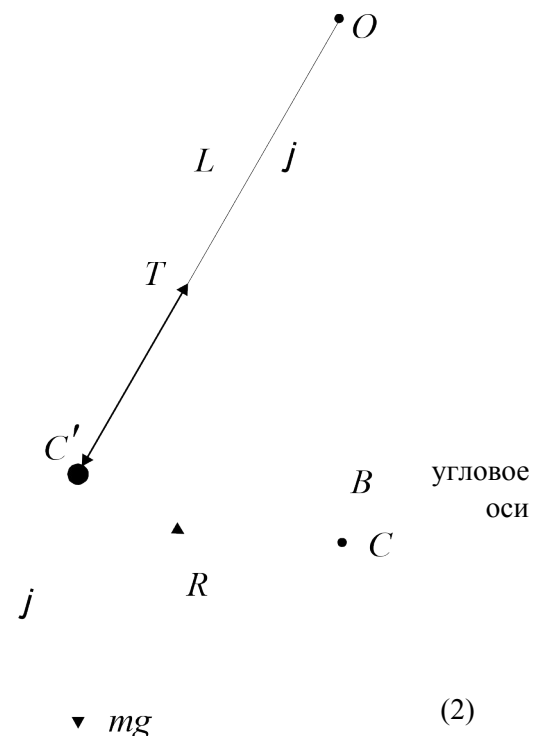


Рис. 1. Математический маятник

(3)

$$I\varepsilon = mg\vec{l} \cdot \vec{\sin}(\vec{L}, \wedge \vec{g}) + \vec{T}l \cdot \vec{\sin}(\vec{T}, \wedge \vec{l}), \quad (4)$$

где $\vec{L}$ – радиус-вектор точки, модуль которого равен длине подвеса $|\vec{L}| = l$.

Очевидно, что угол $\vec{(\vec{L}, \wedge \vec{g})} = -\varphi$, а угол $\vec{(\vec{T}, \wedge \vec{L})} = 0$. Тогда

$$I\varepsilon = -mg \cdot \sin \varphi \quad (5)$$

Или, так как $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$

$$— \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \cdot \sin \varphi = 0 \quad (6)$$

Для достаточно малых углов $\sin \varphi \approx \varphi$, тогда

$$— \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \varphi = 0, \quad (7)$$

где $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$.

Решение уравнения (7) представляет собой гармоническую функцию, соответствующую гармоническому колебанию

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \alpha_0), \quad (8)$$

где φ_0 – амплитуда, ω_0 – частота так называемых собственных колебаний, α_0 – начальная фаза.

Период колебаний связан с циклической частотой соотношением $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$, тогда период математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (9)$$

Из равенства (9) следует, что малые колебания математического маятника не зависят от амплитуды. Такие колебания называются изохронными.

Равенство (9) получено для колебаний маятника с малой амплитудой, когда можно пользоваться приближенной формулой $\sin \varphi \approx \varphi$. При больших амплитудах эта формула не применима и период колебаний будет зависеть от угла отклонения.

Экспериментальная установка

Используемый маятник – шарик на тонкой прочной (нерастяжимой) нити, закреплённой на штативе. Полная длина маятника l – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шарика (рис.2).

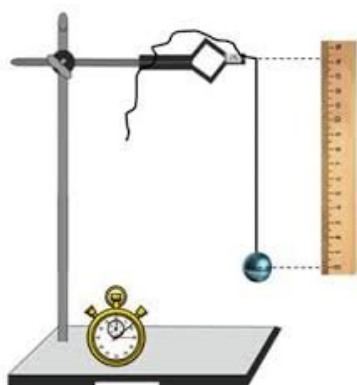


Рис. 2. Схема установки.

Проведение эксперимента

Задание 1. Проверка независимости периода колебаний математического маятника от его массы.

1. Для проверки необходимо использовать тела разной массы, но имеющие одинаковые размеры и форму, что позволяет считать силу сопротивления воздуха во всех опытах одинаковой. При этом тела не обязательно должны иметь шарообразную форму. Угол отклонения маятника из положения равновесия не должен превышать 5° .

Задание 2. Изучение зависимости периода колебаний математического маятника от его длины и определение ускорения свободного падения.

1. Подвешивают на нити стальной груз. Длину подвеса изменяют в пределах от $0,8$ до $1,8$ м с шагом приблизительно 10 см. Число колебаний в каждом опыте $10-20$. Полученные данные заносят в таблицу 2 отчета. Угол отклонения маятника из положения равновесия не должен превышать 5° .

2. Зависимость $T=f(l)$ нелинейная. Поэтому для удобства экспериментальной проверки эту зависимость следует линеализировать. Для этого можно, например, построить график зависимости квадрата периода колебаний от длины маятника $T^2=f(l)$. Если экспериментальные точки ложатся на прямую с небольшим разбросом, то можно сделать вывод о выполнении формулы (9).

3. Для определения с помощью полученного графика ускорения свободного падения необходимо найти угловой коэффициент прямой, т.е. значение тангенса угла наклона графика к оси l . Вычисляют ускорение свободного падения.

Контрольные вопросы.

1. Какое движение механической системы называется колебательным? Что называется периодом и частотой колебаний?
2. Какая система называется математическим маятником?
3. Какие колебания называются гармоническими? Что такое амплитуда и фаза колебаний.
4. Какие колебания называются изохронными? Являются ли колебания математического маятника изохронными? При каком условии колебания математического маятника можно считать изохронными?

Лабораторная работа 4 ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: изучение основных закономерностей колебательного движения физического маятника.

Идея эксперимента

В эксперименте исследуется физический маятник, представляющий собой прямой стержень, колеблющийся вокруг осей, расположенных на разном расстоянии от центра тяжести стержня.

Теория

Колебания являются одним из наиболее распространенных видов движения. При достаточно малых отклонениях от положения равновесия колебания бывают обычно гармоническими.

Физическим маятником называется твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания неподвижной горизонтальной оси O , не проходящей центр масс C тела (рис. 1).

Если маятник выведен из положения равновесия на угол j , то составляющая $\vec{F}$ силы тяжести $m\vec{g}$ уравнивается силой реакции оси O , а $F_t = -mg \sin j$

(1)

Знак минус означает, что угловое смещение j и возвращающая сила $\vec{F}_t$ имеют противоположные направления. При достаточно малых углах отклонения из положения равновесия $\sin j \approx j$, поэтому $F_t \approx -mgj$. маятник в процессе колебаний совершает вращательное движение относительно оси O , то оно может быть описано законом динамики вращательного движения

$$M = J\epsilon, \quad (2)$$

где M – момент силы F_t относительно оси O , J – момент

$$J = \frac{d^2 j}{dt^2}$$

маятника относительно оси O , Equation.3 – ускорение маятника.

Момент силы в данном случае равен

$$M = F_t \times l = -mgj \times l, \quad (3)$$

где l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника.

С учетом (2) уравнение (1) можно записать в виде

$$J \frac{d^2 j}{dt^2} + mgjl = 0 \quad (4)$$

или

$$\frac{d^2 j}{dt^2} + \omega_0^2 j = 0, \quad (5)$$

где $\omega_0^2 = mgl/J$

Решением дифференциального уравнения (5) является функция

$$j = j_0 \cos(\omega_0 t + a), \quad (6)$$

позволяющая определить положение маятника в любой момент времени t . Из выражения (6) следует, что при малых колебаниях физический маятник совершает гармонические колебания (колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по законам синуса или косинуса) с амплитудой колебаний j_0 ,

циклической частотой $\omega_0 = \sqrt{mgl/J}$, начальной фазой a и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (7)$$

где $L = J/(mg)$ – приведенная длина физического маятника, т.е. длина такого математического маятника, период которого совпадает с периодом физического маятника.

Формула (7) позволяет определить момент инерции твердого тела относительно любой оси, если измерен период колебаний этого тела относительно этой оси.

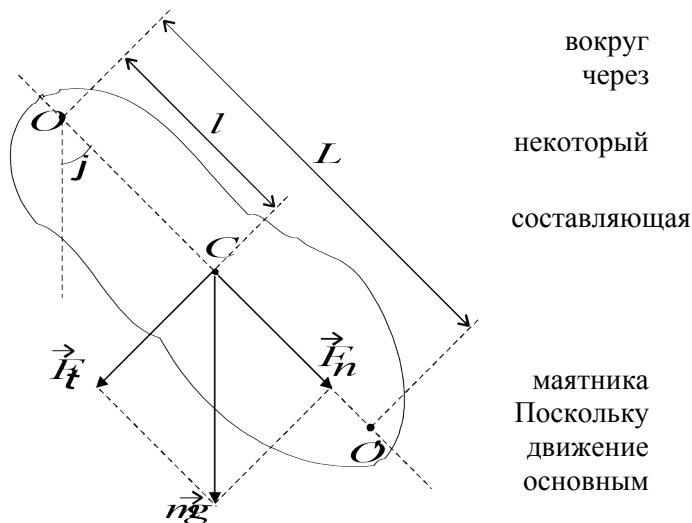


Рис. 1. Физический маятник

инерции

угловое

Если физический маятник имеет правильную геометрическую форму и его масса равномерно распределена по всему объему, в формулу (7) можно подставить соответствующее выражение для момента инерции (Приложение 1). Например, для физического маятника, имеющего вид однородного стержня, колеблющегося вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной стержню, формула (7) приобретает вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l^2 + d^2 / 12}{l \times g}}$$

(8)

где d – длина стержня, l – расстояние от оси качаний до центра тяжести стержня.

Экспериментальная установка

Применяемый в данной работе физический маятник состоит из однородного металлического стержня и опорной призмы, которая может перемещаться вдоль стержня. Можно также использовать стержень с отверстиями, с помощью которых маятник одевается на горизонтальную ось. Период колебаний маятника измеряется с помощью секундомера.

Проведение эксперимента

Изучение зависимости периода колебаний физического маятника от расстояния между осью качаний и центром тяжести маятника.

Измерения

Измеряют периоды колебаний T физического маятника при различных расстояниях l между центром тяжести и осью качаний. Шаг изменения расстояния l выбирают с таким расчетом, чтобы получить 8-10 экспериментальных точек. Число колебаний в каждом опыте 15-20. Угол отклонения маятника от положения равновесия около 4°. Полученные данные заносят в таблицу 1 отчета.

Обработка результатов

1. Строят график зависимости $T^2l = f(l^2)$.
2. Если экспериментальные точки ложатся на прямую с небольшим разбросом, то можно сделать вывод о правильности формулы периода колебаний физического маятника.
3. Используя соотношения $\frac{4\pi^2}{g} = k$ и $\frac{4\pi^2}{g} \cdot \frac{d^2}{12} = b$, где k – тангенс угла наклона прямой к оси l^2 , b – отрезок, отсекаемый прямой по оси T^2l , вычисляют ускорение свободного падения g и длину стержня d .
4. Сравнивают полученное значение g с табличным значением, а величину d с длиной стержня. Делают вывод о точности проделанных измерений.

Приложение 1

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом R	Ось симметрии	mR^2
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	Ось симметрии	$\frac{1}{2}mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину	$\frac{1}{12}ml^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец	$\frac{1}{3}ml^2$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр шара	$\frac{2}{5}mR^2$

Контрольные вопросы.

1. Какое движение механической системы называется колебательным? Что называется периодом и частотой колебаний?
2. Какая система называется физическим маятником?
3. Какие колебания называются гармоническими? Что такое амплитуда и фаза колебаний.
4. От чего зависит период колебаний физического маятника?

Лабораторная работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Цель работы – изучение метода оборотного маятника для определения ускорения свободного падения.

Приборы и оборудование: оборотный маятник, секундомер.

Идея эксперимента

Применение оборотного маятника основано на свойстве сопряженности центра качания и точки подвеса. Это свойство заключается в том, что во всяком физическом маятнике можно найти такие две точки, что при последовательном подвешивании маятника за ту или другую из них период колебаний его остается одним и тем же. Расстояние между этими точками определяет собой приведенную длину данного маятника.

Теоретическая часть

Если амплитуда физического маятника мала, то период его колебаний определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl_1}}, \quad (1)$$

где J – момент инерции физического маятника относительно оси качания, l_1 – расстояние между осью качания и центром тяжести маятника, m – масса маятника.

По теореме Гюйгенса – Штейнера

$$J = J_0 + ml_1^2, \quad (2)$$

где J_0 – момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести и параллельной оси качаний, а величины J , m и l_1 те же, что и в формуле (4.1).

Если последовательно подвешивать маятник в двух точках, то периоды его колебаний определяются уравнениями

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + ml_1^2}{mgl_1}}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + ml_2^2}{mgl_2}} \quad (3)$$

Отсюда имеем

$$T_1^2 gl_1 - T_2^2 gl_2 = 4\pi^2 (l_1^2 - l_2^2) \quad (4)$$

Для величины ускорения свободного падения из последней формулы после преобразований получаем уравнение, данное Бесселем:

$$g = \frac{8\pi^2 l}{T_1^2 + T_2^2} \frac{1}{1 + \frac{(T_1^2 - T_2^2)l}{(T_1^2 + T_2^2)(l_1 - l_2)}}, \quad (5)$$

где $l = l_1 + l_2$ – приведенная длина маятника.

Если периоды равны между собой ($T_1 = T_2 = T$), уравнение принимает вид

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2} \quad (6)$$

Добиться полного равенства периодов нелегко. Формула Бесселя позволяет достаточно просто и с наименьшей степенью точности определить величину ускорения при приближенном равенстве периодов колебаний.

Пусть T_1 и T_2 близки друг к другу, а величины l_1 и l_2 сильно отличаются одна от другой. В этом случае, как видно из формулы (5), нет необходимости определять величины l_1 и l_2 с большой степенью точности (не точнее чем 1 мм).

Экспериментальная установка

Оборотные маятники имеют различную форму. Они обычно состоят из металлического стержня, по которому могут передвигаться и закрепляться тяжелые и легкие *чечевицы* (грузы) A_1 и A_2 и опорные призмы Π_1 и Π_2 (рис. 1).

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы законспектируйте краткую теорию.
2. Внимательно изучите лабораторную установку. Сделайте схематический рисунок ее с указанием основных элементов.

Проведение эксперимента и обработка результатов

1. Готовят оборотный маятник к измерениям. Зафиксировать чечевицы на металлическом стержне несимметрично, так чтобы одна находилась вблизи конца стержня, а другая вблизи его середины. Опорные призмы закрепить по обеим сторонам центра масс маятника, так чтобы они были обращены друг к другу вершинами. Одну из них поместить вблизи свободного конца стержня, а вторую на середине расстояния между чечевицами. Проверить, насколько прочно зафиксированы опорные призмы. Закрепить маятник на вкладыше верхнего кронштейна на призме, находящейся вблизи стержня. Подвижную чечевицу A_2 последовательно перемещают с шагом 0,5-1 см от конца маятника к призме Π_2 . В отчете выполняют чертёж маятника с указанием всех размеров, определяющих геометрию маятника.

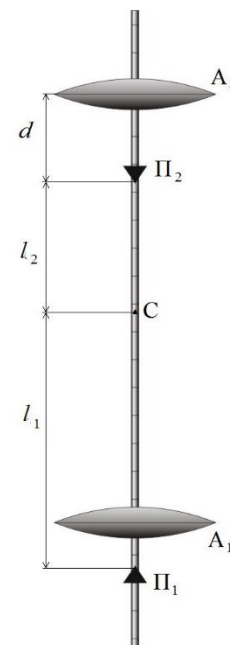


Рис. 1. Оборотный маятник

2. Маятник приводят в колебание на опорной призме Π_1 и определяют период колебаний T_1 . Измерение периода проводят, беря не менее 10 колебаний. Угловая амплитуда колебаний не должна превышать 4° .
3. Меняют ось колебаний, подвешивая маятник на другой призме. Проводят измерения периода T_2 .
4. Перемещают чечевицу A_2 . Снова измеряют периоды колебаний на призмах Π_1 и Π_2 и т. д. Данные измерений заносят в таблицу 1 отчета.
5. По полученным данным строят графики зависимостей $T_1 = f_1(d)$ и $T_2 = f_2(d)$, где d — расстояние от призмы Π_2 до подвижной чечевицы. Точка пересечения кривых определяет такое положение чечевицы A_2 , при котором значения периодов наиболее близки.
6. Для найденного положения чечевицы A_2 определяют периоды колебаний T_1 и T_2 (в прямом и перевернутом положении маятника) с наибольшей тщательностью. Определяют время 15 – 20 колебаний маятника не менее трех раз, откуда вычисляют средние значения периодов колебаний. Данные измерений заносят в таблицу 2 отчета.
7. Для определения положения центра тяжести маятника его тщательно уравнивают на трехгранной подставке. Измерение расстояний l_1 и l_2 производят масштабной линейкой с точностью до миллиметра.
8. По полученным данным с помощью формулы Бесселя (6) определяют величину ускорения свободного падения.
9. В выводе сравнивают измеренное и табличное значения ускорения свободного падения.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения физического, математического, пружинного маятников.
2. К какому типу маятников относится оборотный, в чем состоит его особенность.
3. Сформулируйте теорему Гюйгенса-Штейнера.
4. Получите формулу Бесселя для расчета ускорения свободного падения.
5. Почему для расчета ускорения свободного падения нельзя воспользоваться формулой (1)?
6. Почему при выполнении работы угловая амплитуда колебаний не должна превышать 4° ?

Лабораторная работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ($\gamma = C_p/C_v$) ВОЗДУХА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ (КЛЕМАНА–ДЕЗОРМА).

Цель работы: углубить представления о тепловых свойствах газов и их зависимости от характера тепловых процессов. Освоить один из методов определения отношения теплоемкостей.

Теория

Теплоемкостью тела называется то количество теплоты, которое необходимо сообщить этому телу, чтобы изменить его температуру на 1 градус:

$$C_{\text{тела}} = \frac{\Delta Q_{\text{тела}}}{\Delta T},$$

где $\Delta Q_{\text{тела}}$ – количество теплоты, сообщаемое телу при изменении его температуры на ΔT градусов. Единицей измерения теплоёмкости тела является Дж/К.

Однако, этим понятием пользоваться неудобно, т.к. оно характеризует способность только данного тела, а не вещества из которого оно изготовлено. Поэтому гораздо чаще используют понятие теплоемкости, отнесенное не к произвольному телу, а к единице массы вещества, из которого оно изготовлено. Такая теплоемкость называется **удельной теплоемкостью** c и представляет собой количество теплоты, которое необходимо сообщить единице массы вещества, чтобы изменить ее температуру на 1 градус.

$$c = \frac{C_{\text{тела}}}{m} = \frac{\Delta Q_{\text{тела}}}{m \Delta T},$$

где m – масса тела. Единицей измерения удельной теплоёмкости является $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Еще чаще в физике предпочитают пользоваться понятием молярной теплоемкости. Под **молярной теплоемкостью** C понимают такое количество теплоты ΔQ_M , которое необходимо сообщить одному молю вещества, чтобы изменить его температуру на 1 градус:

$$C = \frac{\Delta Q_M}{\Delta T}, \quad (1)$$

где ΔQ_M – количество теплоты, сообщаемое одному молю вещества при изменении его температуры на ΔT градусов. Единицей измерения молярной теплоёмкости является $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Между удельной и молярной теплоёмкостями существует простая связь:

$$C = Mc, \quad (2)$$

где M – молярная масса данного вещества.

Так дело обстоит только с твердыми и жидкими телами. Газы же могут нагреваться либо при постоянном объеме, либо при постоянном давлении. От этих условий нагревания газа очень сильно зависит их молярная теплоемкость, которую в дальнейшем для краткости будем называть просто теплоемкостью. Согласно первому началу термодинамики, все количество теплоты ΔQ , подводимое к газу, идет на изменение его внутренней энергии ΔU и на совершение газом работы $A = p \Delta V$. Запишем этот закон для одного моля идеального газа:

$$\Delta Q_M = \Delta U_M + p_M \Delta V, \quad (3)$$

где ΔV – изменение объема газа вследствие его теплового расширения. Если количество теплоты ΔQ_M сообщают одному молю газа с целью повысить его температуру на 1 градус ($\Delta T = 1 \text{ K}$), то (1) примет вид:

$$C = \Delta Q_M \text{ или } C = \Delta U_M + p_M \Delta V. \quad (4)$$

Рассмотрим теперь каждое из условий нагревания газа в отдельности.

Нагревание газа при постоянном объеме ($V = \text{const}$, $p_M \neq \text{const}$). В этом случае газ не расширяется ($\Delta V = 0$), а следовательно работа против внешних сил им не совершается. Тогда, согласно (3), все подводимое к газу тепло ΔQ_M идет только на изменение внутренней энергии ΔU_M газа:

$$\Delta Q_M = \Delta U_M.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (4), получаем:

$$C_V = \Delta Q_M = \Delta U_M, \quad (5)$$

где C_V – молярная теплоемкость при постоянном объеме, ΔU_M – изменение внутренней энергии идеального газа при его нагревании на $\Delta T = 1 \text{ K}$. Т.к. $\Delta U_M = \frac{i}{2} R \Delta T = \frac{i}{2} R$, то

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (6)$$

где i – сумма числа степеней свободы поступательного, вращательного и удвоенного числа степеней свободы колебательного движения молекул газа.

Теплоёмкость газа, нагреваемого при постоянном объёме, часто называют *изохорной теплоёмкостью*.

Нагревание газа при постоянном давлении ($p_M = const, V \neq const$). В этом случае $\Delta V \neq 0$ и тепло, подводимое к газу, идет не только на изменение его внутренней энергии, но и на совершение $p_M \Delta V$ против внешних сил. Тогда, согласно (4), получаем:

$$C_p = \Delta U_M + p_M \Delta V,$$

где C_p – молярная теплоемкость газа при постоянном давлении. С учетом (5) имеем:

$$C_p = C_V + p_M \Delta V \tag{7}$$

это означает, что газ, расширяющийся при постоянном давлении, обладает большей теплоемкостью, чем газ, расширяющийся при постоянном объеме, на величину, равную работе $p_M \Delta V$, совершаемой газом против внешних сил.

Выражение (7) чаще записывают в несколько ином виде. Для этого выразим величину $p_M \Delta V$ из уравнения Менделеева-Клапейрона, записанного для одного моля газа:

$$p_M \Delta V = R \Delta T \Rightarrow p_M \Delta V = R \text{ (т.к. } \Delta T = 1 \text{ K)}.$$

Подставляя это выражение в формулу (7), получаем:

$$C_p = C_V + R. \tag{8}$$

Сравнивая выражения (7) и (8), можно сделать очень интересный и важный вывод: *работа одного моля газа против внешних сил, расширяющегося при постоянном давлении, всегда равна универсальной газовой постоянной*.

Численное значение теплоемкости при постоянном давлении зависит от числа степеней свободы молекул газа, которое можно записать в виде:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R. \tag{9}$$

Теплоёмкость газа, нагреваемого при постоянном давлении, часто называют *изобарной теплоемкостью*.

Весьма важное значение при изучении свойств идеальных газов играет отношение молярных теплоемкостей газа C_p к C_V . Это отношение обозначают буквой γ и называют *показателем адиабаты*:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} > 1. \tag{10}$$

Для одноатомных молекул $i = 3$, для двухатомных с вращательной степенью свободы $i = 5$, для двухатомных с вращательной и колебательной степенями свободы $i = 7$, и т. д. Поэтому для сопоставления теории с опытом достаточно сравнивать экспериментальные и теоретические значения γ . Например, для одноатомного газа, согласно теории, $i = 3$ и $\gamma = 5/3 = 1,67$, для 2-х атомного газа при комнатной температуре $i = 5$ и $\gamma = 7/5 = 1,4$.

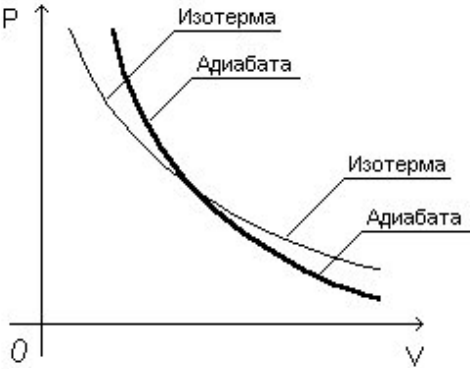
Выражение (10) можно получить, разделив (9) на (6). Важность его заключается в том, что показатель адиабаты является величиной, характерной для каждого газа, и входит в уравнение, описывающее адиабатические процессы в газах. Это уравнение называется *уравнением адиабаты* или *уравнением Пуассона*:

$$PV^\gamma = const. \tag{11.a}$$

Заменяя в (11.a) PV^γ через $PV \cdot V^{\gamma-1}$ и применяя уравнение Менделеева-Клапейрона, получим иную запись уравнения Пуассона:

$$TV^{\gamma-1} = const. \tag{11.6}$$

Следует заметить, что уравнение Пуассона, описывающее адиабатические процессы, очень похоже на уравнение Бойля-Мариотта ($PV = const$), описывающее изотермические процессы. Однако, показатель степени в уравнении Пуассона (11.a) свидетельствует о том, что всегда располагается круче изотермы (рис.1). Иными тангенс угла наклона касательной к адиабате в γ раз тангенса угла наклона касательной к изотерме.



адиабата
словами,
больше

Экспериментальная установка

Рис. 1.

Лабораторная работа выполняется на базе лабораторного комплекса ЛКТ-5 (рисунок 2). Основной элемент комплекса – баллон объемом 3,25 л. Баллон снабжен клапаном КЗ, позволяющим быстро сбрасывать давление газа в баллоне. Педаль клапана выведена на панель прибора. Клапан открывается при нажатии на педаль. В целях безопасности на баллон в рабочем состоянии надет чехол из плотной ткани.

Элементы комплекса соединены шлангами из синтетического материала. Краны К1 и К2 пережимают соответствующие шланги. Полная схема соединений элементов изображена на передней панели прибора. Исследуемый газ подается в баллон через штуцер Ш2, при этом происходит удаление влаги из газа.

Если осушение не требуется, то газ подается через штуцер Ш1. Штуцер ШЗ позволяет соединить баллон с дополнительными устройствами.

Традиционным методом определения величины показателя адиабаты является метод адиабатического расширения или, как его ещё называют, метод Клемана-Дезорма. Экспериментальная установка (рис. 2) этого метода представляет собой достаточно большого объема сосуд, который при помощи резиновых шлангов и двух клапанов, может соединяться либо с окружающей средой, либо с компрессором. Разность давлений внутри сосуда и снаружи измеряется манометром. Суть метода состоит в следующем. Когда клапан «Сброс» открыт, то воздух массой m_0 , заполняющий сосуд объемом V_0 , находится под давлением, равным атмосферному p_0 , а температура его равна температуре окружающей среды T_0 . Для определения показателя адиабаты воздуха следует изначально находящийся в сосуде газ массой m_0 последовательно провести через три различных состояния.

Первое состояние: закрывают клапан «КЗ», открывают клапан «К1» и повышают давление воздуха в баллоне до тех пор, пока разность давлений в баллоне и окружающей среде не достигнет ~ 200 мм рт. ст. Далее необходимо выждать некоторое время, пока температура воздуха в баллоне, возросшая из-за быстрого нагнетания, не станет равной температуре T_0 окружающей среды, о чём можно судить по прекращению изменения давления. Вследствие нагнетания в сосуд некоторого количества газа, масса воздуха m_0 , занимавшего изначально весь объем V_0 сосуда, окажется в сжатом состоянии и будет теперь занимать меньший объем $V_1 < V_0$, находясь при этом под давлением $p_1 = p_0 + \Delta p_1$ (где Δp_1 – разность давлений воздуха внутри сосуда и с наружи) при температуре окружающей среды T_0 .

Второе состояние: открывают клапан «КЗ» и позволяют газу, находящемуся в баллоне под повышенным давлением, как можно быстрее расшириться до давления, равного атмосферному, после чего клапан «КЗ» тут же закрывают. На этом этапе эксперимента происходит следующее. При расширении воздуха его температура понижается. Поскольку процесс расширения газа протекает очень быстро, то температура внутри баллона не успевает выровняться с температурой воздуха в комнате. Поэтому такой процесс можно считать протекающим практически без теплообмена с окружающей средой, т.е. адиабатическим.

Поэтому к моменту расширения газа до атмосферного давления p_0 его температура T_2 оказывается несколько ниже комнатной температуры T_0 ($T_2 < T_0$), объем воздуха массой m_0 несколько возрастет до величины $V_2 < V_0$.

Третье состояние. По истечении некоторого промежутка времени газ в баллоне вследствие теплообмена с окружающей средой нагреется до комнатной температуры T_0 , в результате чего его давление возрастет до некоторой величины $p_2 = p_0 + \Delta p_2$ (где Δp_2 – разность давлений воздуха внутри сосуда и с наружи). Объем воздуха массой m_0 останется прежним.

Ниже в таблице сведены воедино параметры газа в каждом из трех описанных состояний.

Параметр системы	Первое состояние	Второе состояние	Третье состояние
Давление	$p_1 = p_0 + \Delta p_1$	p_0	$p_2 = p_0 + \Delta p_2$
Температура	T_0	$T_2 < T_0$	T_0
Объем	$V_1 < V_0$	$V_1 < V_2 < V_0$	$V_3 = V_2$

Адиабатический процесс перехода газа из *первого* состояния во *второе* может быть описан уравнением Пуассона:

$$\frac{p_0^{\gamma-1}}{T_0^\gamma} = \frac{p_0^{\gamma-1}}{T_2^\gamma}.$$

(12)



Рис. 2

Поскольку переход газа из *второго* состояния в *третье* происходит изохорически (см. таблицу), то этот процесс может быть описан законом Шарля:

$$\frac{p_0}{T_2} = \frac{p_2}{T_0}. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (12) и (13), получаем:

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^\gamma = \frac{p_1}{p_0}. \quad (14)$$

Логарифмируя выражение (14), получаем формулу для расчета показателя адиабаты:

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_0}{\lg p_1 - \lg p_2}. \quad (15)$$

раскладывая выражение (15) в ряд Тейлора и ограничиваясь его первыми двумя членами, а так же учитывая, что $p_1 = p_0 + \Delta p_1$ и $p_2 = p_0 + \Delta p_2$, получаем:

$$\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}. \quad (16)$$

Измерения и обработка результатов

1. Закрыть штуцер ШЗ заглушкой.
2. Закрыть кран К2.
3. Подключить грушу-помпу к штуцеру Ш1.
4. Открыть кран КЗ и убедиться, что давление в баллоне равно атмосферному (стрелка манометра должна стоять на отметке «0»).
5. Накачать в баллон воздух до избыточного давления Δp_1 , после чего закрыть кран К1. Подождать 1-2 минуты, пока установится температура воздуха, и давление перестанет изменяться. Если необходимо, аккуратно довести давление до заданного значения, слегка приоткрывая кран К2 или накачивая воздух грушей. Полученное значение записать в таблицу 1 отчета.
6. На короткое время с открыть кран КЗ баллона (опустить вниз педаль до упора) и снова закрыть его (отпустить педаль) сразу после прекращения шипения выходящего из сосуда воздуха. На этом этапе эксперимента следует помнить, что точность измерений во многом зависит именно от времени истечения воздуха при открытом клапане. Этот процесс должен длиться ровно столько времени, сколько необходимо для выравнивания давления воздуха внутри сосуда с давлением атмосферным при соблюдении условия адиабатичности процесса. Этому состоянию будет соответствовать прекращение шипения выходящего через кран КЗ воздуха. Подождать 1-2 минуты до установления температуры и давления в баллоне. Записать установившееся избыточное давление Δp_2 в таблицу 1 отчета.
7. Повторить опыт ещё 19 раз, нагнетая каждый раз в баллон воздух до разного избыточного давления Δp_1 .
8. Определить показатель адиабаты по формуле (16).
9. Сравнить полученный результат с теоретическим.
10. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Теплоёмкость тела, удельная и молярная теплоёмкости.
2. Теплоёмкость газа при изохорическом нагревании.
3. Теплоёмкость газа при изобарическом нагревании.
4. Какой процесс называется адиабатическим? Приведите примеры адиабатных процессов.
5. Запишите уравнение Пуассона.
6. Почему при адиабатном расширении температура газа падает, а при сжатии возрастает?
7. В чем суть способа определения показателя адиабаты методом адиабатического расширения (Клемана-Дезорма)?

Лабораторная работа 7

Изучение распределения Максвелла

Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Распределение Максвелла». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и составьте конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

Цель работы

- Знакомство с компьютерной моделью, описывающей поведение молекул идеального газа.
- Экспериментальное подтверждение распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям.
- Экспериментальное определение массы молекул в данной модели.

Краткая теория

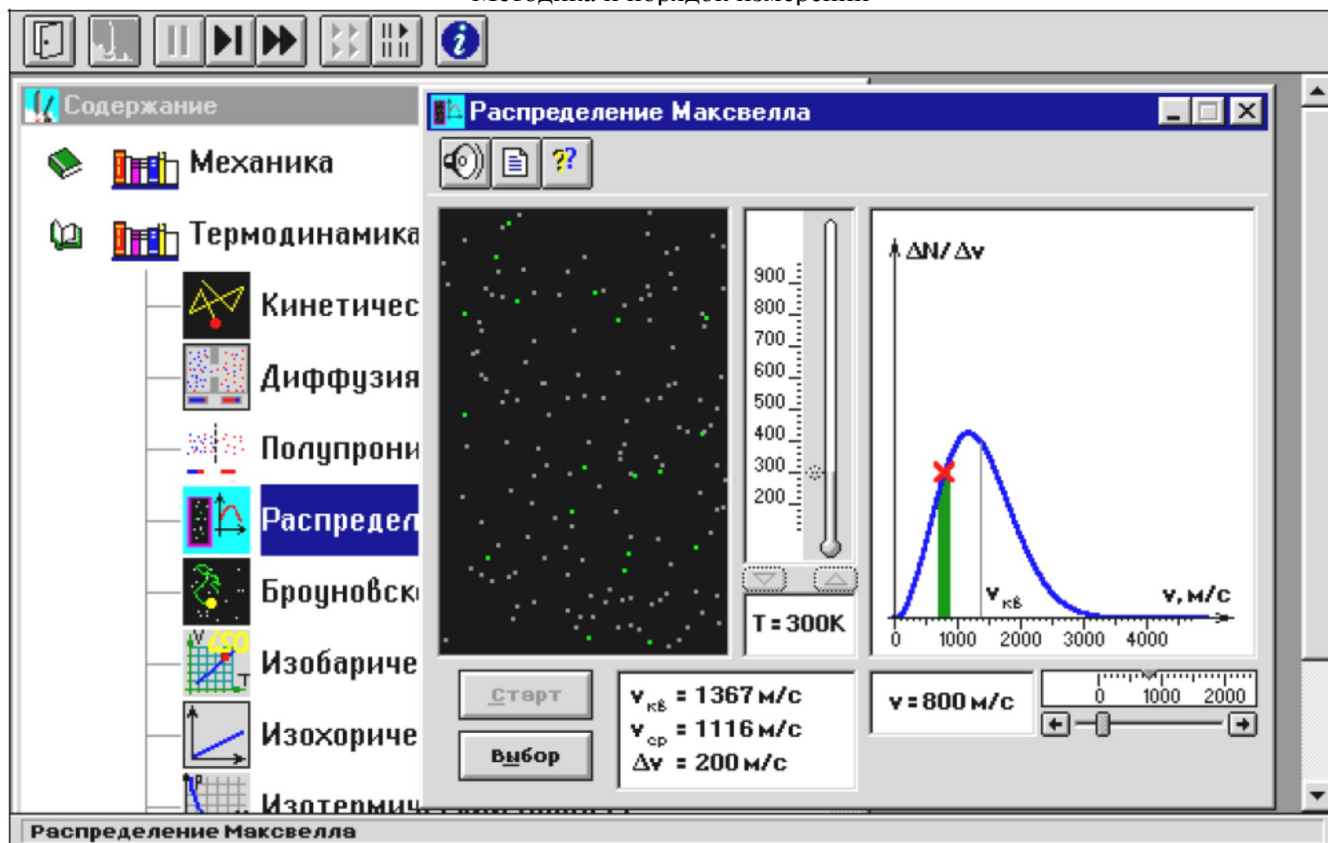
Вероятностью P_i получения некоторого результата измерения называется предел отношения количества измерений, давших этот результат, (N_i) к полному числу измерений N , когда $N \rightarrow \infty$.

Элементарной вероятностью dP_v при измерении **величины скорости** v называется вероятность наличия скорости величиной от v до $v + dv$. Эта вероятность пропорциональна приращению скорости dv : $dP_v = F(v) dv$, где коэффициент пропорциональности $F(v)$ называется **функцией распределения** молекул по величине скорости. Она может быть выражена через другие функции распределения:

$$F(v) = \phi(v_x) \cdot \phi(v_y) \cdot \phi(v_z) \cdot 4\pi v^2 = f(v) \cdot 4\pi v^2,$$

где $\phi(v_x)$, $\phi(v_y)$ и $\phi(v_z)$ – функции распределения для соответствующих **проекций** скоростей молекул, а $f(v)$ – их произведение.

Методика и порядок измерений



Внимательно рассмотрите рисунок, составьте конспект лабораторной работы.

Внимательно рассмотрите изображение на экране монитора компьютера. Обратите внимание на систему частиц, движущихся в замкнутом объеме слева во внутреннем окне. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Их количество около 100 и данная система является хорошей «механической» моделью идеального газа. В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки « $\uparrow$ » вверх) и получать как бы «мгновенные фотографии», на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном диапазоне Δv вблизи заданной скорости (т.е.

имеющие скорости от до $+\Delta$). Для продолжения наблюдения движения частиц надо нажать кнопку «П». Запишите в тетрадь значение Δ , указанное на экране.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Измерения

1. Нажмите кнопки «П», «СТАРТ» и «ВЫБОР» и установите температуру T_1 , указанную в табл. 1 для вашей бригады. Запишите для нее значение наиболее вероятной скорости.
2. Установите скорость выделенной группы молекул вблизи минимального заданного в форме 1 значения.
3. Нажмите клавишу « $\downarrow$ » и подсчитайте на «мгновенной фотографии» количество молекул ΔN , скорости которых лежат в заданном диапазоне Δv вблизи заданной скорости молекул (они более яркие). Результат запишите в таблицу по форме 1. v
4. Нажмите кнопку «П» и через 10–20 секунд получите еще одну мгновенную фотографию (нажав кнопку « $\downarrow$ »). Подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результат запишите в таблицу по форме 1.
5. Повторите еще 3 раза измерения для данной скорости и результаты запишите в таблицу по форме 1.
6. Измените скорость до значения, указанного в форме 1, и выполните по 5 измерений (как в п.4) для каждой скорости.
7. Установите (как в п.1) вторую температуру T_2 из табл.1. Запишите для нее значение наиболее вероятной скорости.
8. Повторите измерения (по п. 2,3,4,5), записывая результат в форму 1.

Результаты измерений при $T = \text{--- К}$

Форма 1

v [км/с]=	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
ΔN_1							
ΔN_2							
ΔN_3							
ΔN_4							
ΔN_5							
$\Delta N_{\text{ср}}$							

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения.
2. Дайте определение элементарной вероятности при измерении величины скорости.
3. Что такое функция распределения?
4. Как связаны функции распределения величины и проекции скорости?
5. Каковы особенности графика функции распределения величины скорости для молекул идеального газа?
6. Как вычисляется среднее значение некоторой физической величины A , если известна ее функция распределения $f(A)$?
7. Напишите формулу для вычисления среднего значения скорости молекул.
8. Напишите формулу для вычисления средней квадратичной скорости молекул.
9. Напишите условие для вычисления наиболее вероятной скорости молекул.
10. Напишите выражение для средней скорости молекул идеального газа.
11. Напишите выражение для средней квадратичной скорости молекул идеального газа.
12. Напишите выражение для наиболее вероятной скорости молекул идеального газа.
13. Вычислите, на сколько процентов отличаются средняя и средняя квадратичная скорости молекул идеального газа.
14. Вычислите, на сколько процентов отличаются средняя и наиболее вероятная скорости молекул идеального газа.

Лабораторная работа 8

ИЗУЧЕНИЕ ЦИКЛА КАРНО ИДЕАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

Запустите программу «Термодинамика и молекулярная физика», «Цикл Карно». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите краткие сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

Цель работы

- Знакомство с компьютерной моделью, иллюстрирующей цикл Карно для идеального газа.
- Экспериментальное определение работы, совершенной газом за цикл.
- Экспериментальная проверка теоремы Карно.

Краткая теория

Циклом Карно называется круговой процесс, состоящий из двух изотермических процессов и двух адиабатических процессов (см. окно теории).

Рабочим телом называется термодинамическая система, совершающая процесс и предназначенная для преобразования одной формы передачи энергии – теплоты или работы – в другую. Например, в тепловом двигателе рабочее тело совершает работу за счет части тепла, получаемого от нагревателя.

Нагревателем (теплоотдатчиком) называется устройство, сообщаемое рассматриваемой термодинамической системе энергию в форме тепла.

Холодильником (теплоприемником) называется система (окружающая среда или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного па-ра), поглощающая часть тепла рабочего тела.

Прямым циклом называется круговой процесс, в котором рабочее тело совершает положительную работу:

>0 . На графике p - V прямой цикл изображается в виде замкнутой кривой, проходимой рабочим телом в виде замкнутой кривой, причем при расширении давление (и температура) должны быть больше, чем при сжатии.

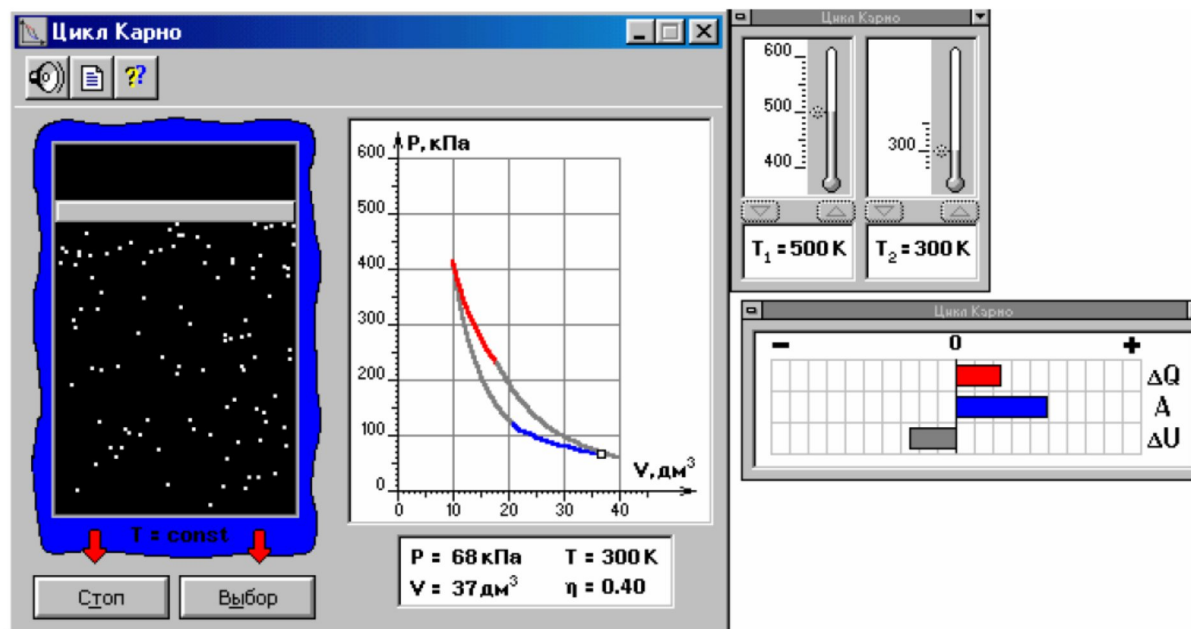
Работа любого теплового двигателя состоит из повторяющихся циклов, каждый из которых включает в себя получение рабочим телом энергии от нагревателя, расширение рабочего тела и совершение им работы, передачу части энергии холодильнику и возвращение рабочего тела в исходное состояние. Работа, совершаемая рабочим телом за один полный цикл, складывается из работы, совершенной им при расширении, и работы, совершенной им при сжатии: $A = A_{\text{расш}} + A_{\text{сж}}$.

Учитывая, что при сжатии газ совершает отрицательную работу, последнее равенство можно переписать в виде

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}|.$$

При наличии холодильника газ перед сжатием или во время сжатия охлаждается, и потому процесс совершения им работы при сжатии протекает при меньшем давлении, чем при расширении. Поэтому $|A_{\text{сж}}| < A_{\text{расш}}$, и, следовательно, $A > 0$.

Эксперимент



Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие устройства называют тепловыми двигателями?
2. Из каких основных элементов состоит тепловой двигатель?
3. Зачем в тепловом двигателе нужен холодильник?
4. Что является холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
5. Чем отличаются обратимые и необратимые процессы? Почему все реальные процессы необратимы?
6. Дайте понятие энтропии (определение, размерность и математические выражения изменения энтропии для различных изопроцессов идеальных газов).

Лабораторная работа 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТЕЛ.

Цель работы: экспериментальное изучение фазового перехода первого рода.

Оборудование: лабораторный комплекс ЛКТ-8, модуль 01 ПЕЧЬ-ТЕРМОСТАТ, кабель СШ7 –СШ7 (500 мм), тигель алюминиевый (объем 48 мл, масса 60 г), сплав Розе, глицерин, секундомер.

Теория

Твёрдые тела принято делить на кристаллические и аморфные. **Кристаллами** называются твердые тела, формирующиеся в виде многогранников. Отличительным признаком кристаллических тел является их **анизотропность**, т.е. различие физических свойств в разных направлениях внутри него. Это означает, что кристаллические тела в разных направлениях могут обладать различными акустическими свойствами, различным коэффициентом преломления света, разной величиной коэффициента теплового расширения и т.д.

Другими, не менее важным и интересным, свойством кристаллов является их способность **самоограничиваться**, т.е. принимать многогранную форму в результате свободного роста в подходящей для этого среде. Это означает, что выточенный, например, из каменной соли шарик, будучи помещенным в расплав или раствор такой же соли, со временем покроется гранями. Шарик же вырезанный из воска и помещенный в соответствующую среду, так и останется шариком (воск – не кристаллическое вещество).

Кристаллы условно делят на **монокристаллы** и **поликристаллы**. **Монокристаллами** называются одиночные кристаллы с очень хорошо просматривающейся кристаллической структурой. Такие кристаллы встречаются довольно редко и только в природе. К их числу следует относить, прежде всего, кристаллы кварца (горного хрусталя SiO_2) и каменной соли. Те же кристаллы встречаются, которые состоят из большого числа маленьких кристалликов или, как говорят, обладают поликристаллической структурой, называются **поликристаллами**. К их числу относится большинство окружающих нас тел и, прежде всего, металлы.

Как анизотропность, так и способность кристаллов к самоогранке объясняются почти совершенной симметрией их строения. Рентгеновский анализ строения кристаллов убеждает в том, что только кристаллы обладают столь совершенным порядком в расположении составляющих их частиц (атомов, молекул или ионов). Все частицы кристаллической решетки находятся в непрерывном колебательном движении вблизи некоторых положений равновесия, расположенных в вершинах правильных геометрических фигур (куба, тетраэдра, гексаэдра и т.д.). Такие места положений равновесия колеблющихся частиц называют **узлами** кристаллической решетки. Пространственное расположение частиц, образующих правильные геометрические формы, называется **элементарной ячейкой** кристалла. Весь кусок кристаллического тела состоит из великого множества элементарных ячеек, непрерывно переходящих одна в другую и образующих таким образом **кристаллическую решетку**. По форме, размерам и величине углов наклона элементарных ячеек, кристаллы делят на семь сингоний:

1. правильная или кубическая система $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
2. гексагональная система $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$
3. тетрагональная система $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. тригональная система $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma < 120^\circ \neq 90^\circ$
5. ромбическая система $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. моноклинная система $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
7. триклинная система $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma$

В таблице 1 показаны 7 сингоний и 4 типа решеток (элементарных ячеек Браве).

Сингония Тип решётки	Три- клинная	Куби- ческая	Тетраго- нальная	Ромби- ческая	Триго- нальная (ромбоэд- рическая)	Гексаго- нальная	Моно- клинная
Примитивный							
Базоцентри- рованный							
Объёмноцен- трированный							
Гранецентри- рованный							

Рис. 1. Элементарные ячейки Браве

По роду частиц, образующих кристаллическую решетку различают следующие четыре типа решеток:

- Атомные решетки, образованные нейтральными атомами. Такая связь носит название *гомеополярной* (например, алмаз).
- Молекулярные решетки, образованные нейтральными молекулами (H_2O , CO_2).
- Ионные решетки, образованные ионами разного знака. Такая связь носит название *гетерополярной* (всевозможные соли). Так, например, кристаллическая решетка поваренной соли ($NaCl$) образована положительными ионами Na^+ и отрицательными ионами Cl^- . Их электростатическое притяжение и обеспечивает довольно большую прочность кристалла.
- Металлические решетки, образованные положительными ионами металла, в пространстве между которыми хаотично и беспорядочно «летают» свободные электроны проводимости. Силы электростатического отталкивания, действующие между одноименными ионами в узлах решетки, не могут привести к разрушению кристалла благодаря действию сил электростатического притяжения свободных электронов, которые, в свою очередь, не могут покинуть кристалл благодаря силам электростатического притяжения со стороны положительных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки. По причине особого характера сил, удерживающих металлические решетки в стационарном состоянии, такие решетки принято выделять в особую группу.

Энергия кристаллической решетки.

Колеблющиеся в узлах кристаллической решетки атомы обладают, естественно, определенной энергией, складывающейся из энергии движения и потенциальной энергии E_p взаимодействия друг с другом:

$$E_p = -\frac{C\phi}{R^{k_1}} + \frac{C\phi}{R^{k_2}},$$

где отрицательный член $-\frac{C\phi}{R^{k_1}}$ этого равенства соответствует силам притяжения, а положительный $\frac{C\phi}{R^{k_2}}$ – силам отталкивания.

Графически зависимость этих величин от расстояния между центрами масс частиц представлена рис.2а.

Рассмотрим поведение двух частиц одной элементарной ячейки.

Расстояние R_0 на рис. 2а соответствует расстоянию между двумя смежными узлами кристаллической решетки. Тепловое движение приводит к периодическому отклонению каждой частицы от этого положения равновесия, в котором воздействие на данную частицу со стороны всех остальных частиц решетки скомпенсировано. При расстояниях между центрами масс частиц $R < R_0$ начинают проявляться силы отталкивания, возвращающие обе частицы на расстояние R_0 друг от друга, предотвращая, таким образом, проникновение одной частицы во внутрь другой. В случае же удаления частиц друг от друга ($R > R_0$) проявляются силы притяжения между данной частицей и ее «соседкой», так же стремящиеся вернуть частицы на расстояние R_0 друг от друга и не позволяющие частицам «разлететься» на слишком большое расстояние, что неминуемо привело бы к разрушению кристаллической решетки.

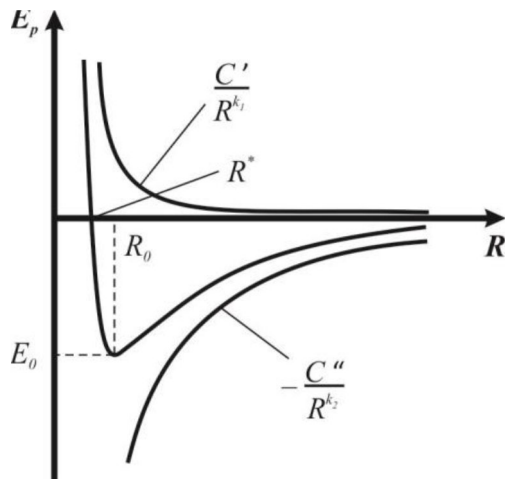


Рис. 2 а

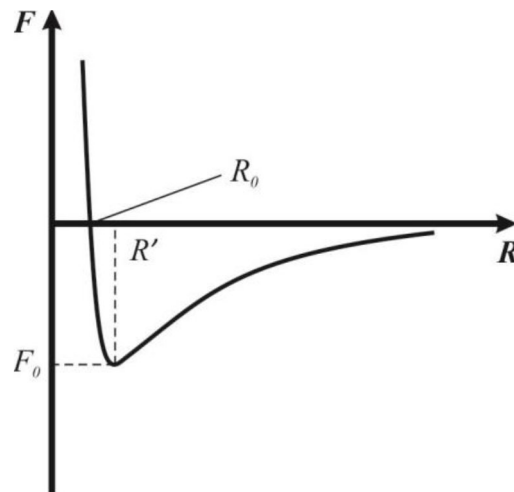


Рис. 2 б

Как следует из хода результирующей кривой, силы отталкивания между частицами кристалла проявляют себя только на малых расстояниях между частицами и по мере их сближения возрастают гораздо быстрее, чем возрастают силы притяжения при удалении частиц друг от друга. Это возможно только если показатели степени в выше приведенном уравнении удовлетворяют условию $k_2 > k_1$ (так для гетерополярных решеток $k_1 = 1$ и $k_2 = 9$).

На рис. 10.2б показан график зависимости результирующей силы взаимодействия частиц, очень похожий на график только что рассмотренной зависимости (т.к. $F = -dE/dR$). Сопоставляя эти кривые, можно заметить, что расстоянию $R = R_0$ соответствуют минимум потенциальной энергии и равенство нулю равнодействующей силы взаимодействия частиц. Это – положение равновесия ($F = 0$), к которому стремится любая система и в котором потенциальная энергия системы минимальна.

Плавление и кристаллизация.

Плавлением кристаллического тела называется процесс превращения его из твердого состояния в жидкое. **Кристаллизацией** называется процесс, обратный процессу плавления.

Расплавить кусок кристаллического тела можно, постепенно нагревая его. График этого процесса, изображенный на рис.3, имеет три участка. На участке *ab* температуре кристаллического тела плавно возрастает, что соответствует обычному нагреву твердого тела. По достижении определенной температуры $T_{пл}$, называемой **температурой плавления**, рост температуры прекращается (изотермический участок *bc*) до тех пор, пока все вещество не превратится в жидкость. Вещество в этом состоянии нельзя назвать ни жидкостью, ни твердым телом: в сосуде находятся одновременно обе фазы – твердая и жидкая. Этот участок кривой соответствует процессу плавления. Рост температуры возобновится (участок *cd*) сразу после того, как будет расплавлен последний кристаллик вещества. Этот участок кривой соответствует обычному нагреву жидкости.

Как объяснить наблюдаемый факт? Почему на участке *bc*, несмотря на непрерывающийся приток тепла извне, температура системы остается постоянной? Дело в том, что частицы

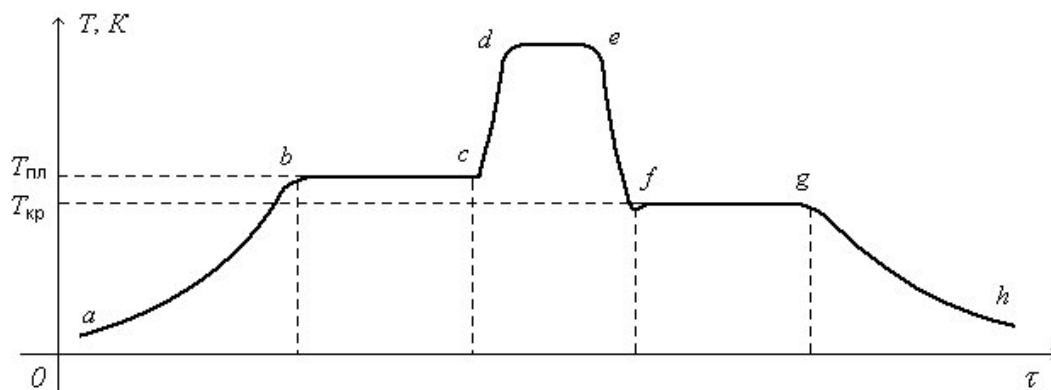


Рис. 3. Кривые плавления кристаллического тела.

кристаллической решетки обладают только энергией колебательного движения, в то время как частицы жидкости обладают еще и энергией поступательного движения. Иными словами, частицы жидкости обладают большей энергией, чем частицы кристаллической решетки. Следовательно, для того, чтобы полностью расплавить кусок кристаллического тела, необходимо его частицам сообщить некоторое количество энергии Q_1 , равное энергии поступательного движения частиц жидкости. Сделать это можно, нагревая это кристаллическое тело. Поэтому в период плавления частицы еще не расплавленного кристалла преобразуют получаемую ими извне тепловую энергию в **энергию поступательного движения**. В результате чего температура всей системы остается постоянной. После же того, как все вещество будет расплавлено, поступающее в систему тепло будет затрачиваться на увеличение кинетической энергии частиц расплавленного вещества, т.е. на увеличение скорости их поступательного движения – температура вновь начнет возрастать (участок *cd*).

Кривая кристаллизации так же имеет изотермический участок *fg*, соответствующий процессу кристаллизации. Для того, чтобы жидкость перевести в кристаллическое состояние, необходимо, чтобы её частицы потеряли определенную долю своей энергии, равную энергии их поступательного движения, «оставив при себе» только энергию колебательного движения. Именно эта доля, равная энергии поступательного движения частиц жидкости, и выделяется в виде теплоты в период кристаллизации, компенсируя отток тепла из системы и поддерживая температуру всей системы постоянной. После полной кристаллизации вещества дальнейший отток из системы тепла приведет к дальнейшему понижению температуры уже кристаллического тела. Проявляется это в уменьшении амплитуды колебательного движения частиц в узлах кристаллической решетки.

Ядра кристаллизации, образование переохлажденной и перегретой жидкостей.

Теоретически температуры плавления и кристаллизации жидкостей должны совпадать по своей величине. Однако, так происходит далеко не всегда. Обычно температура кристаллизации несколько (а иногда и значительно) ниже температуры плавления. Объясняется это следующим образом. Процесс кристаллизации жидкости всегда начинается на некоторых неоднородностях в объеме жидкости, которые называются **центрами** или **ядрами кристаллизации**. Ядрами кристаллизации могут служить различные неоднородные включения (обычно пыль). При наличии большого числа таких ядер (загрязненное вещество) процесс кристаллизации протекает очень легко и температура кристаллизации действительно совпадает с температурой плавления. В совершенно чистом веществе, свободном от инородных включений, ядрами кристаллизации начинают служить молекулы уплотнения, представляющие собой случайные увеличения концентрации молекул жидкости (плотности жидкости) по всему объему жидкости. Однако, такие случайные (флуктуационные) образования неспособны существовать слишком долго. При температуре жидкости выше или равной температуре плавления, эти молекулярные уплотнения настолько быстро распадаются, что кристаллические зародыши не успевают появиться на них и кристаллизация не происходит. Это обстоятельство в значительной мере затрудняет процесс кристаллизации жидкости, но не блокирует его вовсе. При дальнейшем понижении температуры жидкости время жизни молекулярных уплотнений возрастает и становится вполне достаточным для образования на них мельчайших кристалликов вещества, дальнейший рост которых приводит к полной кристаллизации всей жидкости. Происходит это при температуре, ниже температуры плавления. Такие жидкости называют **переохлажденными**. Значительно ускорить процесс кристаллизации можно некоторым встряхиванием сосуда с переохлажденной жидкостью (при этом возрастает число молекулярных уплотнений) или введением в жидкость кристаллика такого же вещества. Таким образом температура кристаллизации одного и того же вещества не является величиной постоянной и зависит от степени загрязненности исследуемого вещества.

Возможен и несколько иной механизм переохлаждения жидкостей. В том случае, если температуру понижать очень быстро, то ее частицы не будут успевать терять необходимую долю своей энергии, приходящейся на их поступательное движение, и следовательно, не смогут образовать кристаллической решетки. Тем не менее, дальнейшее и быстрое понижение температуры приводит к увеличению вязкости такой жидкости, что затрудняет поступательное движение ее частиц. Вещество затвердевает, не образуя при этом кристаллической решетки. Такие вещества называют так же **переохлажденными жидкостями** или **стеклообразными** веществами. Очень часто их относят к разряду аморфных тел, несмотря на то, что механизм образования последних, вообще говоря, несколько отличен от механизма образования стеклообразных веществ. Практика причисления последних к аморфным телам объясняется тем, что переохлажденная жидкость достаточно долгое время после ее образования проявляет свойства аморфных тел, но процесс образования кристаллов в ней, в отличие от поистине аморфных тел, все-таки происходит (хотя и очень медленно) и с течением времени стеклообразное тело все же превращается в кристаллическое.

Возможен и вариант образования перегретой жидкости. Механизм такого процесса аналогичен механизму образования стеклообразных веществ.

АМОРФНЫЕ ТЕЛА.

К аморфным телам относятся тела, которые при затвердевании не образуют кристаллической решетки. Основным свойством аморфных тел является их изотропность, т. е. постоянство физических свойств во всех направлениях внутри тела. Аморфные тела, даже в твердом состоянии, обладают текучестью, хотя и очень незначительной. Это позволяет рассматривать их как нечто среднее между кристаллическими телами и жидкостями повышенной вязкости.



Рис. 4. Кривые плавкости аморфного тела.

Кривые плавления и отвердевания аморфных тел, показанные на рисунке 4, лишены изотермических участков. Вместо них имеются лишь точки перегиба, соответствующие состоянию размягчения аморфного тела. Для аморфных тел невозможно указать значение температуры, при которой в сосуде одновременно будут присутствовать обе фазы - твёрдая и жидкая. Температура, соответствующая точке перегиба, называется *температурой размягчения*.

Экспериментальная установка

Лабораторная работа выполняется на базе лабораторного комплекса ЛКТ-8 (рис. 5). Все элементы комплекса размещены в двух этажах каркаса 1. Нижний этаж – служебный. В нем размещена измерительная система ИСТ-4К (поз.2) и приборный блок (поз.3). Верхний этаж – рабочая зона. В нем размещены функциональные модули.

На правой боковине каркаса установлена клемма заземления. В работе используется Модуль 01 ПЕЧЬ- ТЕРМОСТАТ (рис.6), состоящий из плиты 3, установленной на основании прибора 6 на ножках 5, и окруженной теплоизолирующим кожухом 1. В плиту встроены два тепловыделяющих элемента (ТВЭЛ) 4 и датчик температуры 2. Плита может охлаждаться вентилятором 7. Сопротивление ТВЭЛ печи равно 10 Ом, максимальное напряжение питания – 20 В, максимальная мощность – 40 Вт.



Рис. 5

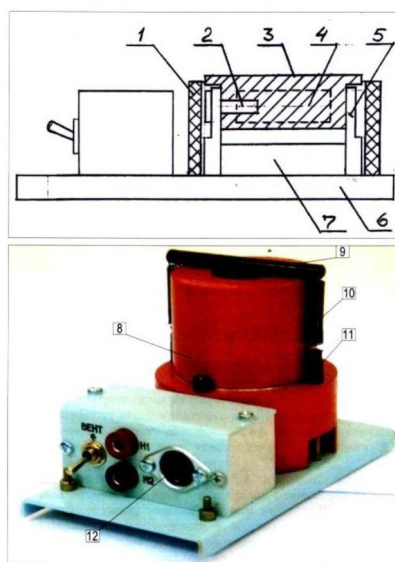


Рис.6

Исследуемый (нагреваемый) объект устанавливается на плите и прижимается к ней стержнем 9 с помощью двух пружин 10. Пружины прицеплены к двум штырям 11 и при необходимости могут быть сняты. На объект надевается теплоизолирующий кожух (поз.8). Через разъем 12 модуль подключается к разъему ОБЪЕКТ ИСТ-4. Тумблер «ВЕНТ» включает вентилятор. Гнезда «Н1» и «Н2» включены параллельно нагревателю и используются для измерения напряжения на нагревателе при необходимости точного определения выделяемой в нагревателе мощности (вольтметр измерительной системы ИСТ-4 не учитывает падение напряжения на проводах кабеля, что приводит к небольшой погрешности в определении мощности).

В лабораторной работе определяется температура кристаллизации сплава Розе (50% Bi, 28% Pb и 22% Sn по массе).

Измерения и обработка результатов

Задание. Определение температуры кристаллизации тел.

1. По ртутному термометру определить температуру окружающей среды и записать в таблицу 1 отчета T_c .
2. Определить массу исследуемого образца путем взвешивания на лабораторных весах тигля с образцом и пустого тигля и записать в таблицу 1 отчета.

3. Установить тигель на плите термостата, зафиксировав его на печи с помощью огнеупорного кожуха и пружинного фиксатора. Для теплового контакта нанесите предварительно на плиту 2-3 капли глицерина.
4. Соединить кабелем контакт «ТЕРМОСТАТ» с контактом печи-термостата (семиштырьковый кабель СШ7 – СШ7).
5. Установить регулятор напряжения ТВЭЛ печи («НАГРЕВ») на 20 В. Мощность нагрева печи при этом будет 40 Вт.
6. Произвести нагрев с постоянной мощностью до 120°C (регулятор «Т1» должен быть установлен на максимальную температуру).
7. После того, как температура полностью расплавившегося образца превысит 120°C, выключите печь.
8. Через каждые 10 с заносить в таблицу 2 отчета значения температуры.
9. Получив около 100 значений, заполнить таблицу 2 окончательно.
10. Построить график зависимости ($T = f(\tau)$)
11. По графику определить температуру кристаллизации вещества T_k .

Контрольные вопросы.

1. Понятие анизотропии.
2. Кристаллические и аморфные тела.
3. Динамика процессов плавления и кристаллизации.
4. Нагрев аморфных тел.
5. Процесс переохлаждения и возникновения ядер кристаллизации.
6. Каковы причины различия температур плавления и кристаллизации?

Лабораторная работа 10

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Запустите программу «Эл-магн.Кванты». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
- * Экспериментальное подтверждение законов Ома и Кирхгофа.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ (СИЛЫ) ТОКА

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ: величина (сила) тока, текущего по однородному (в смысле отсутствия сторонних сил) металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения U

$$I = \frac{1}{R} U$$

на проводнике, где R - сопротивление проводника.

РЕЗИСТОРом называется устройство, обладающее заданным постоянным сопротивлением.

НАПРЯЖЕНИЕ НА РЕЗИСТОРЕ $U_R = IR$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ

$$I = \frac{j_1 - j_2 + E_{12}}{R}$$

, где j_1 и j_2 - потенциалы концов участка E_{12} - э.д.с., действующая на данном участке цепи.

$$I = \frac{E}{R}$$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ, где E - суммарная э.д.с., действующая в цепи, R - суммарное сопротивление всей цепи.

РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПЬЮ называется электрическая цепь, имеющая узлы.

УЗЛОМ называется точка, в которой сходится более чем два проводника. Ток, текущий к узлу, принято считать положительным, а ток, текущих от узла, считается отрицательным.

ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum I_k = 0.$$

ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА: в каждом из замкнутых контуров, которые можно мысленно выделить в данной разветвленной цепи, алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме э.д.с.

$$\sum I_k R_k = \sum E_k$$

При анализе разветвленной цепи следует обозначать с одним индексом ток, протекающий по всем последовательно соединенным элементам от одного узла до другого. Направление каждого тока выбирается произвольно.

При составлении уравнений второго правила Кирхгофа токам и э.д.с. нужно приписывать знаки в соответствии с выбранным (как вам удобно) направлением обхода:

- ток принято считать положительным, если он совпадает с направлением обхода, и отрицательным, если он направлен против этого направления;
- э.д.с. считается положительной, если ее действие (создаваемый ею ток) совпадает с направлением обхода.

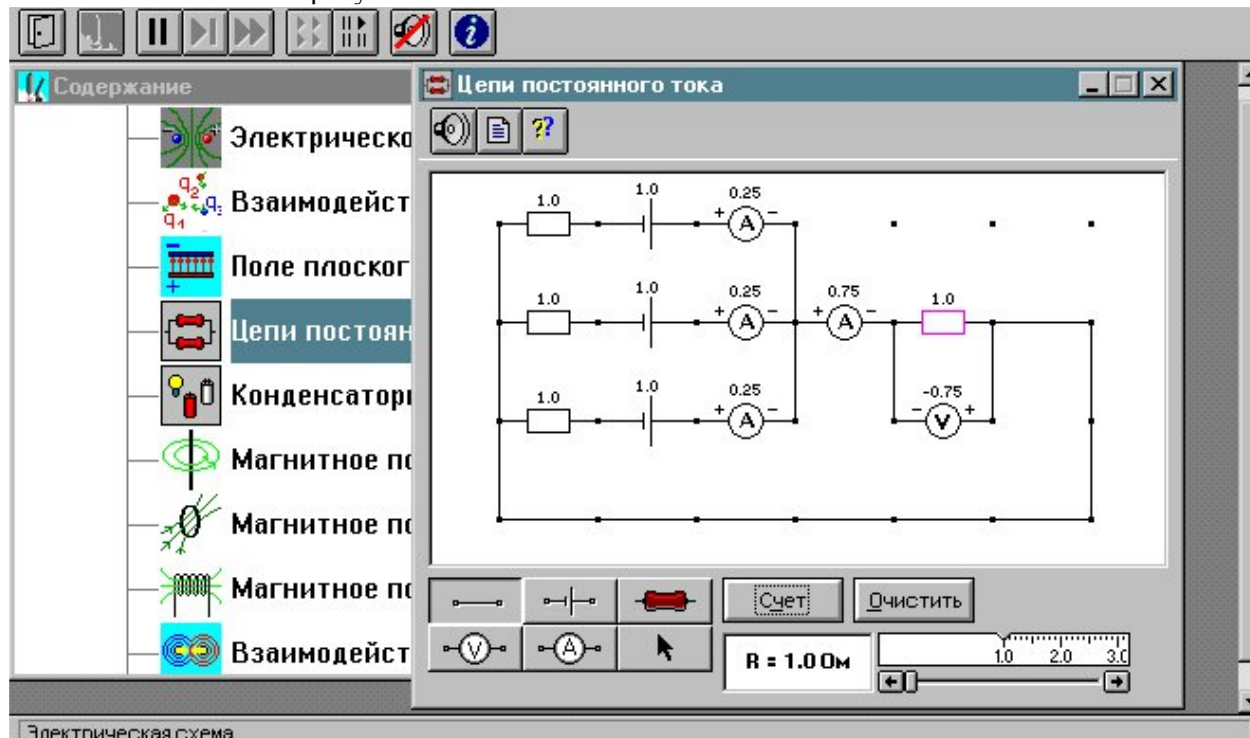
Количество уравнений первого правила Кирхгофа должно быть на одно меньше количества узлов в данной цепи. Количество независимых уравнений второго правила Кирхгофа должно быть таким, чтобы общее количество уравнений оказалось равным количеству различных токов.

Каждый новый контур при этом должен содержать хотя бы один участок цепи, не вошедший в уже рассмотренные контуры.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

В данной лабораторной работе исследуется модель простейшей разветвленной электрической цепи, состоящей из трех источников э.д.с., подключенных параллельно к одному резистору (нагрузке).

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.



Нарисуйте в конспекте эквивалентную схему цепи, расположив источники один под другим и учитывая наличие внутреннего сопротивления у каждого источника. Укажите знаки э.д.с., направления токов в каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура. Составьте систему уравнений для нахождения токов в каждом участке.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ:

Соберите на экране заданную эквивалентную цепь. Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой э.д.с. в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Ориентируйтесь на рисунок схемы в описании к данной ЛР. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен первый источник э.д.с. Переместите маркер мыши вниз на одну клетку и снова щелкните левой кнопкой под тем местом, где расположился первый источник. Там появится второй источник э.д.с. Аналогично разместите и третий источник.

Разместите далее последовательно с каждым источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку R в нижней части экрана) и амперметр (кнопка A там же). Затем расположите резистор нагрузки и последовательно соединенный с ним амперметр. Под нагрузкой расположите вольтметр, измеряющий напряжение на нагрузке.

Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкните левой кнопкой мыши в точке, где проходит провод.

Установите значения параметров для каждого элемента. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Затем щелкните на данном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом

состоянии, меняйте величину параметра и установите числовое значение, равное взятому из таблицы 1 для вашей бригады.

Установите сопротивления резистора нагрузки $R = 1 \text{ Ом}$. Измерьте значения всех токов и напряжения на нагрузке (щелкнув мышью по кнопке «Счет») и запишите их в таблицу 2. Меняя сопротивление R , повторите измерения параметров и заполните таблицу 2.

Таблица 1. Значения э.д.с. и внутреннего сопротивления источников (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_1, E_2, E_3 \text{ [В]}$	3,7,-2	4,-3,-8	3,6,-4	6,-2,-8	-6,5,8	5,8,-4	-4,6,-7	8,-4,6
$R_1, R_2, R_3 \text{ [Ом]}$	2,1,1	1,3,1	2,1,2	1,1,2	2,1,1	1,2,1	1,1,2	1,3,1

Таблица 2. Результаты измерений

$R \text{ [Ом]}$	$I_1 \text{ [А]}$	$I_2 \text{ [А]}$	$I_3 \text{ [А]}$	$I \text{ [А]}$	$U \text{ [В]}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Таблица 3. Результаты расчета

$I_1 \text{ [А]}$	$I_2 \text{ [А]}$	$I_3 \text{ [А]}$	$I \text{ [А]}$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Запишите для вашей цепи решение системы уравнений для всех токов в общем виде.

Рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите в таблицу 3.

Постройте график экспериментальной зависимости падения напряжения на нагрузке U от тока I через нее.

Сформулируйте выводы по графику.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрический ток?
2. Дайте определение величины (силы) тока.
3. Дайте определение разности потенциалов (напряжения).
4. Напишите формулу, связывающую приращение потенциалов и напряжение.
5. Что такое резистор?
6. Напишите формулу для сопротивления последовательно соединенных резисторов.
7. Напишите формулу для сопротивления параллельно соединенных резисторов.
8. Напишите закон Ома для участка цепи. Сравните его с законом Ома в дифференциальной (локальной) форме.
9. Какой участок цепи называется неоднородным?
10. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи.
11. Какими характеристиками описывается источник ЭДС?
12. Сформулируйте первый закон Кирхгофа. Какое свойство заряда он отражает?
13. Запишите формулу для первого закона Кирхгофа.
14. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
15. Запишите формулу для второго закона Кирхгофа.
16. Что такое узел электрической цепи?
17. Что такое полная электрическая цепь?

Лабораторная работа 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА.

Цель работы: экспериментально подтвердить утверждение о том, что заряд электрона можно определить используя явление электролиза.

Оборудование и материалы: источник питания, кювета с двумя медными электродами, амперметр, весы, провода, секундомер, медный купорос, дистиллированная вода.

Теоретическая подготовка к работе.

Сущность электролиза заключается в выделении из электролита, при протекании через электролитическую ванну постоянного тока, частиц вещества и осаждении их на погруженных в ванну электродах (электроэкстракция) или в переносе веществ с одного электрода через электролит на другой (электролитическое рафинирование). В обоих случаях цель процессов – получение возможно более чистых незагрязненных примесями веществ.

В отличие от электронной электропроводности металлов в электролитах (растворах солей, кислот и оснований в воде и в некоторых других растворителях, а также в расплавленных соединениях) наблюдается ионная электропроводность.

Электролиты являются проводниками второго рода. В этих растворах и расплавах имеет место электролитическая диссоциация – распад на положительно и отрицательно заряженные ионы.

Если в сосуд с электролитом – электролизер поместить электроды, присоединенные к электрическому источнику энергии, то в нем начнет протекать ионный ток, причем положительно заряженные ионы – катионы будут двигаться к катоду (это в основном металлы и водород), а отрицательно заряженные ионы – анионы (хлор, кислород) – к аноду.

У анода анионы отдают свой заряд и превращаются в нейтральные частицы, оседающие на электроде. У катода катионы отбирают электроны у электрода и также нейтрализуются, оседая на нем, причем выделяющиеся на электродах газы в виде пузырьков поднимаются вверх.

Электрический ток во внешней цепи представляет собой движение электронов от анода к катоду (рис. 1). При этом раствор обедняется, и для поддержания непрерывности процесса электролиза приходится его обогащать. Так осуществляют извлечение тех или иных веществ из электролита (электроэкстракцию).

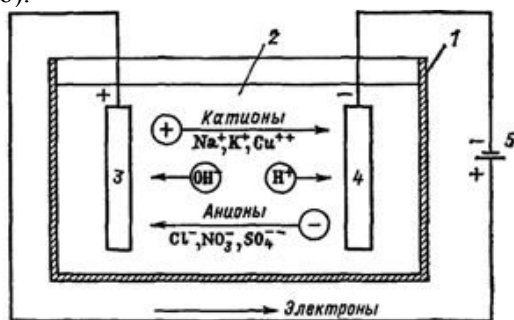


Рис. 1. Процессы, протекающие при электролизе. Схема электролизной ванны: 1 - ванна, 2 - электролит, 3 - анод, 4 - катод, 5 - источник питания.

Если же анод может растворяться в электролите по мере обеднения последнего, то частицы его, растворяясь в электролите, приобретают положительный заряд и направляются к катоду, на котором осаждаются, тем самым осуществляется перенос материала с анода на катод. Так как при этом процесс ведут так, чтобы содержащиеся в металле анода примеси не переносились на катод, такой процесс называется электролитическим рафинированием.

Если электрод поместить в раствор с ионами того же вещества, из которого он изготовлен, то при некотором потенциале между электродом и раствором не происходит ни растворения электрода, ни осаждения на нем вещества из раствора.

Такой потенциал называется нормальным потенциалом вещества. Если на электрод подать более отрицательный потенциал, то на нем начнется выделение вещества (катодный процесс), если же более положительный, то начнется его растворение (анодный процесс).

Если в электролите имеются ионы разных металлов, то первыми на катоде выделяются ионы, имеющие меньший отрицательный нормальный потенциал (медь, серебро, свинец, никель), щелочноземельные металлы выделить труднее всего. Кроме того, в водных растворах всегда имеются ионы водорода, которые будут выделяться ранее, чем все металлы, имеющие отрицательный нормальный потенциал, поэтому при электролизе последних значительная или даже большая часть энергии затрачивается на выделение водорода.

Путем специальных мер можно воспрепятствовать в известных пределах выделению водорода, однако металлы с нормальным потенциалом меньше 1 В (например, магний, алюминий, щелочноземельные металлы) получить электролизом из водного раствора не удастся. Их получают разложением расплавленных солей этих металлов.

Течение катодных и анодных реакций при электролизе определяется следующими двумя законами Фарадея.

1. Масса вещества m , выделившегося при электролизе на катоде или перешедшего с анода в электролит, пропорциональна количеству прошедшего через электролит электричества $q=It$ (I – сила тока, t – время): $m = kq$, здесь k – электрохимический эквивалент вещества, г/Кл. Электрохимический эквивалент численно равен массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единичного электрического заряда, и зависит от химической природы вещества.

2. Электрохимические эквиваленты различных веществ относятся, как их химические эквиваленты. Химическим эквивалентом иона называется отношение молярной массы (M) иона к его валентности n . Поэтому электрохимический эквивалент:

$$k = \frac{1}{F} \times \frac{M}{n}$$

$F = 96485,3383$ Кл/моль – постоянная Фарадея.

Электрохимический эквивалент вещества представляет собой массу вещества в граммах, выделяемую единицей проходящего через электролитическую ванну количества электричества – кулоном (ампер-секундой).

На основании двух этих законов можно сформулировать объединенный закон Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \times \frac{M}{n} It \quad (1)$$

Для меди $M = 63,54$ г/моль, $n = 2$, $k = 63,54/96480 \cdot 2 = 0,000329$ г/Кл, для никеля $k = 0,000304$ г/Кл, для цинка $k = 0,00034$ г/Кл.

В действительности масса выделившегося вещества всегда меньше указанной, что объясняется рядом побочных процессов, проходящих в ванне (например, выделением водорода на катоде), утечками тока и короткими замыканиями между электродами.

Отношение массы фактически выделившегося вещества к массе его, которая должна была бы выделиться по закону Фарадея, носит название выхода вещества по току η .

Следовательно, для реального процесса $m = \eta \cdot \frac{1}{F} \times \frac{M}{n} It$. Естественно, всегда $\eta < 1$.

Применение электролиза

Электролиз широко применяют в технике для различных целей. Электролитическим путём покрывают поверхность одного металла тонким слоем другого (никелирование, хромирование, омеднение и т.п.). Это прочное покрытие защищает поверхность от коррозии.

Если обеспечить хорошее отслаивание электролитического покрытия от поверхности, от которую осаждается металл (этого достигают, например, нанося на поверхность графит), то можно получить копию с рельефной поверхности.

В полиграфической промышленности такие копии (стереотипы) получают с матриц (оттиск набора на пластичном материале), для чего осаждают на матрицах толстый слой железа или другого материала. Это позволяет воспроизвести набор в нужном количестве экземпляров. Если раньше тираж книги ограничивался числом оттисков, которые можно получить с одного набора (при печатании набор стирается), то сейчас использование стереотипов позволяет значительно увеличить тираж. Правда, в настоящее время с помощью электролиза получают стереотипы только для книг высококачественной печати.

Процесс получения отслаиваемых покрытий – гальванопластика был разработан русским учёным Б.С. Якоби (1801–1874), который в 1836 г. применил этот способ для изготовления полых фигур для Исаакиевского собора в Ленинграде.

При помощи электролиза осуществляют очистку металлов от примесей. Так, полученную из руды неочищенную медь отливают в форме толстых листов, которые затем помещают в ванну в качестве анодов. При электролизе медь анода растворяется, примеси, содержащие ценные и редкие металлы выпадают на дно, а на катоде оседает чистая медь.

При помощи электролиза получают алюминий из расплавов бокситов. Именно этот способ получения алюминия сделал его дешёвым и наряду с железом самым распространённым в технике и быту металлом.

Методика и ход проведения эксперимента.

Поскольку число Фарадея можно представить как

$$F = N_A \cdot e, \quad (2)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. Из объединенного закона Фарадея для электролиза (1) и равенства (2) следует, что заряд электрона может быть определен соотношением:

$$e = \frac{M}{mnN_A} It, \quad (3)$$

где m – масса вещества, выделившегося на катоде, M – его молярная масса, n – валентность этого вещества, N_A – число Авогадро, I – сила тока при электролизе, t – время протекания тока.

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В качестве электролита используют водный раствор медного купороса. В кювету устанавливают два медных электрода на расстоянии 3-4 см один от другого.

1. Измерьте массу электрода m_1 , который в последствии будет подключен к отрицательному полюсу источника электропитания.
2. Соберите электрическую цепь по рис. 2, соблюдая полярность («+» к «+», «-» к «-»). Электроды подключают к цепи, вставляя их отогнутые лепестки в прорези штекеров соединительных проводов.
3. Приготовьте насыщенный раствор медного купороса.
4. Подключите источник питания к электросети и заполните кювету раствором медного купороса, значение тока должно быть порядка 0,3 А.
5. Включите источник и одновременно с этим начните отсчет времени. Запишите первое показание амперметра.
6. На протяжении 20 минут с интервалом в одну минуту измеряйте и записывайте величину силы тока в цепи.
7. **Отключите источник электропитания!**
8. Аккуратно (чтобы не осыпалась медь) достаньте и просушите катод, просушите его не менее 15-20 минут, измерьте массу катода m_2 .
9. Вычислите массу осевшей на катоде меди: $m = m_2 - m_1$.
10. Определите по формуле (3) величину заряда электрона.

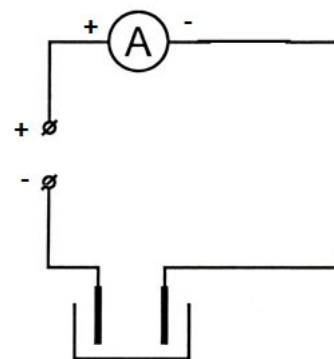


Рис. 2

Контрольные вопросы:

1. Что такое электролиз?
2. Сформулируйте основные законы электролиза.
3. Каково применение электролиза?

Лабораторная работа 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКИХ СРЕД С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА.

Цель работы: расширить представления о явлении преломления света, о полном внутреннем отражении; изучить принцип действия и правила работы с рефрактометром и определить показатель преломления жидких сред.

Оборудование и материалы: рефрактометр ИРФ-22; водные растворы поваренной соли различных концентраций; пипетка; мягкая ткань для протирания оптических деталей приборов.

Теоретическая подготовка к работе.

Длины световых волн, которые воспринимает наш глаз, очень малы (менее 1 мкм). Поэтому распространение света во многих случаях можно рассматривать, отвлекаясь от его волновой природы и полагая, что свет распространяется вдоль некоторых линий, называемых лучами. В пределе, соответствующем $\lambda \rightarrow 0$, законы оптики можно сформулировать на языке геометрии. Соответствующий раздел оптики называют *геометрической или лучевой оптикой*.

В основе геометрической оптики лежат три закона: закон прямолинейного распространения света; закон отражения света; закон преломления света.

Закон прямолинейного распространения света: в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Доказательством этого закона может служить наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их точечными источниками света (источники, размеры которых значительно меньше освещаемого предмета и расстояния до него). Однако необходимо отметить, что этот закон нарушается, если свет проходит сквозь очень малые отверстия, причем отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия.

На границе раздела сред свет меняет направление своего распространения, часть световой энергии возвращается в первую среду, т.е. происходит *отражение* света. Если вторая среда прозрачна, то часть света при определенных условиях проходит через границу раздела сред, меняя при этом, как правило, направление распространения; это явление называется *преломлением света* (рис. 1).

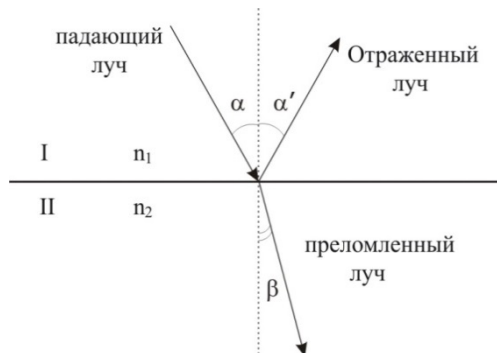


Рис.1

Направление *отраженного* и *преломленного* лучей при прохождении света через плоскую границу раздела двух прозрачных сред определяются законами отражения и преломления света.

Закон отражения света. Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной к плоскости раздела сред в точке падения. Угол падения α равен углу отражения α' : $\alpha = \alpha'$.

Закон преломления света. Преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной к плоскости раздела сред в точке падения. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для данных двух сред, называемая *относительным показателем преломления* второй среды по отношению к первой:

$$n_{21} = \frac{\sin a}{\sin b}. \quad (1)$$

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению скорости распространения света в первой среде v_1 к скорости света во второй среде v_2 :

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2)$$

Если свет идет из вакуума в среду, то показатель преломления среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления этой среды* и равен отношению скорости света в вакууме c к скорости света в данной среде v :

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3)$$

Абсолютные показатели преломления всегда больше единицы $n > 1$; для воздуха n принят за единицу $n_{\text{возд}} \approx 1$.

Относительный показатель преломления двух сред n_{21} можно выразить через их абсолютные показатели n_1 и n_2 , тогда:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin a}{\sin b} \quad (4)$$

Когда свет распространяется из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, т.е. $n_1 > n_2$, то согласно (4) следует, что преломленный луч удаляется от нормали и угол преломления больше угла падения $b > a$. С увеличением угла падения a увеличивается угол преломления b , это происходит до тех пор, пока при некотором угле падения $a = a_{\text{пр}}$ угол преломления b не окажется равным $\frac{\pi}{2}$. Угол $a_{\text{пр}}$ называется предельным углом. При углах падения $a > a_{\text{пр}}$ весь падающий свет полностью отражается.

Приближение угла падения a к предельному $a_{\text{пр}}$ приводит к уменьшению интенсивности преломленного луча и увеличению интенсивности отраженного. В случае когда $a = a_{\text{пр}}$, интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего. Таким образом, при углах падения в пределах от $a_{\text{пр}}$ до $\frac{\pi}{2}$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы, это явление называется полным отражением. Значение $a_{\text{пр}}$ может быть найдено из формулы (4), подстановкой в нее $b = \frac{\pi}{2}$, тогда:

$$\sin a_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (5)$$

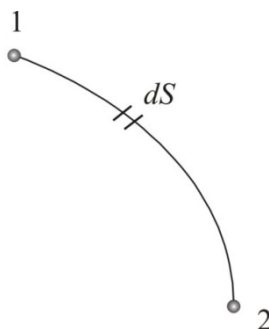


Рис. 2

Уравнение (5) удовлетворяет значениям угла $a_{\text{пр}}$ при $n_2 \leq n_1$, следовательно, явление полного отражения имеет место только при падении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную. Явление полного внутреннего отражения нашло широкое практическое применение (призмы полного внутреннего отражения, световоды и т.д.).

В основу геометрической оптики (вместо приведенных выше трех законов) положен принцип, который сформулировал в XVII веке французский математик Пьер Ферма. Согласно формулировке предложенной самим Ферма: *свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время*.

Рассмотрим путь 1-2, который проходит луч света в неоднородной среде (рис. 2).

Для прохождения пути dS свету потребуется время $dt = \frac{dS}{v}$, где v – скорость света в данной точке среды. Поскольку $v = \frac{c}{n}$, то $dt = \frac{ndS}{c}$, а значит время t , которое затрачивает свет на прохождение пути 1-2, будет равно:

$$t = \frac{1}{c} \int_1^2 n dS = \frac{L}{c}, \quad (6)$$

где $L = \int n dS$ – оптическая длина пути; в однородной среде оптическая длина пути равна $L = nS$, где S – геометрический путь.

Пропорциональность времени прохождения оптической длине пути позволяет сформулировать принцип Ферма следующим образом: *свет распространяется по такому пути, оптическая длина которого минимальна.*

Необходимо отметить, что оптическая длина пути должна быть экстремальной, то есть или минимальной, или максимальной, или стационарной – одинаковой для всех возможных путей. В последнем случае все пути света между точками оказываются *таутохронными* (т.е. требующими для своего прохождения одинакового времени).

Получим с помощью принципа Ферма законы отражения и преломления света.

Пусть луч света попадает из точки A в точку B , отразившись от поверхности (рис. 3); при этом прямой путь из A в B прегражден непрозрачным экраном $\mathcal{E}$. Если среда, в которой распространяется свет, однородна, то минимальность оптической длины пути сводится к минимальности его геометрической длины. Как видно из рис. 3, наименьшей длиной обладает путь луча AOB , для которого угол отражения равен углу падения ($\alpha = \alpha'$), а длина любого из ближайших путей, например $AO\Phi B = A\Phi\Phi B$ будет больше (точка $A\Phi$ – это зеркальное изображение точки A).

Теперь получим с помощью принципа Ферма закон преломления света на границе раздела двух однородных прозрачных сред с показателями преломления n_1 и n_2 . Найдем точку C (рис. 4), в которой должен преломиться луч, распространяясь от точки A к точке B , чтобы оптическая длина пути L была экстремальной.

Оптическая длина пути для произвольного луча равна

$$L = n_1 S_1 + n_2 S_2 = n_1 \sqrt{a_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}. \quad (7)$$

Для нахождения экстремального значения, необходимо продифференцировать L по x и приравнять производную к нулю:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{n_1 x}{\sqrt{a_1^2 + x^2}} - \frac{n_2 (b-x)}{\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}} = n_1 \frac{x}{S_1} - n_2 \frac{b-x}{S_2} = 0.$$

Множители при n_1 и n_2 равны соответственно $\sin \alpha$ и $\sin \beta$, следовательно, получаем соотношение $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$, выражающее закон преломления.

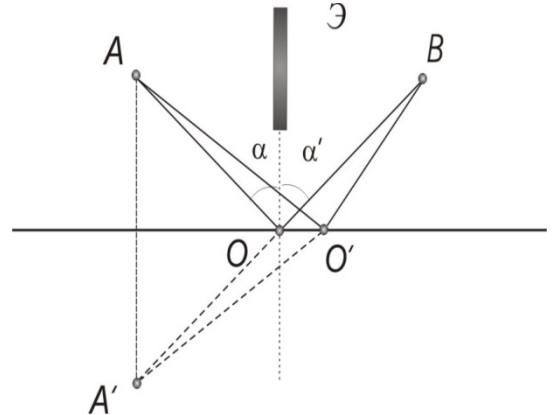


Рис. 3

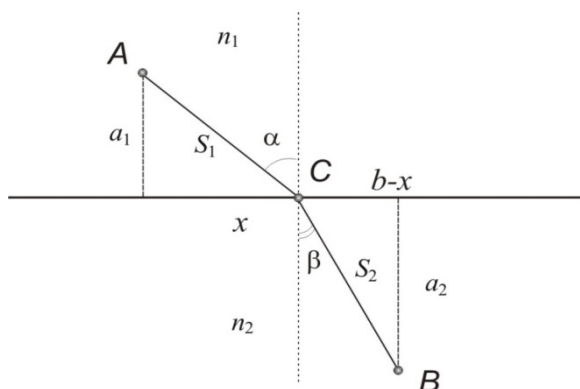


Рис. 4

Экспериментальная установка

Технический рефрактометр Аббе предназначен для определения показателя преломления жидких тел. Современная модель данного прибора – рефрактометр ИРФ-22 представлена на рис. 5.

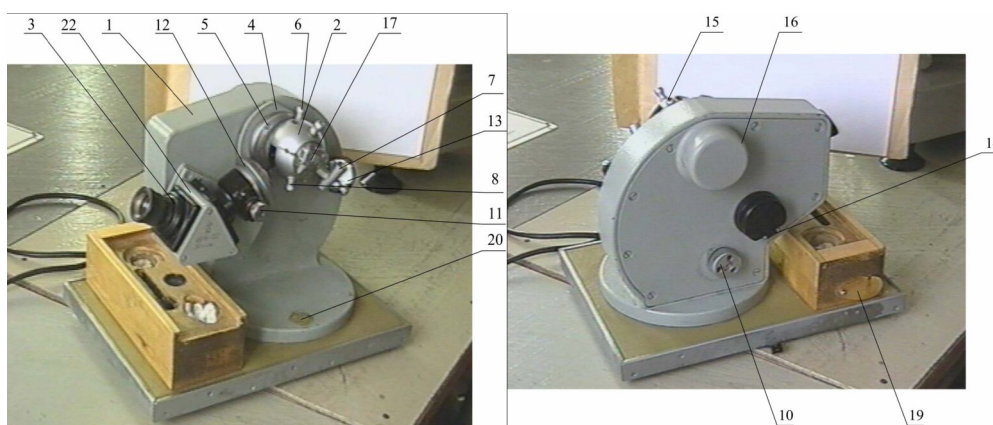


Рис. 5. Рефрактометр ИРФ-22

Прибор ИРФ-22 состоит из следующих основных частей: корпуса 1, измерительной головки 2 и зрительной трубы 3 с отсчетным устройством. В измерительной головке находится призмный блок Аббе, который является основной частью рефрактометра. Призмный блок Аббе состоит из двух стеклянных призм, имеющих вид прямоугольных треугольников и сложенных гипотенузными гранями. Между гранями призм имеется зазор (примерно равный 0,1 мм), который служит для помещения исследуемой жидкости. Верхнюю призму называют вспомогательной, а нижнюю – измерительной. Показатель преломления измерительной призмы, изготовленной из оптически плотного стекла (тяжелый флинт), больше 1.7, а это означает, что измерения показателей преломления с помощью рефрактометра ИРФ-22 могут проводиться для веществ, показатели преломления которых $n < 1.7$. Призмный блок Аббе, жестко связан со шкалой отсчетного устройства, расположенной внутри корпуса. Шкала подсвечивается зеркалом 14 и проектируется специальной оптической системой в поле зрения трубы. Таким образом, в поле зрения трубы одновременно видны границная линия, крест нитей, деления шкалы и визирный штрих шкалы. Чтобы найти границу раздела и совместить ее с перекрестием, необходимо вращая маховичок 10, наклонить измерительную головку. Окрашенность наблюдаемой границы устраняется поворотом компенсатора с помощью маховичка 11. Вместе с компенсатором одновременно вращается барабан 12 со шкалой, по которой в случае необходимости можно измерить дисперсию вещества. Подсветка исследуемого вещества осуществляется с помощью

зеркала 13 дневным светом.

Измерение показателя преломления прозрачных жидкостей на ИРФ-22.

На поверхность измерительной призмы наносят несколько капель исследуемой жидкости и осторожно закрывают головку; наблюдают в окно 15, чтобы жидкость полностью заполнила зазор между измерительной и осветительной призмами. Осветительное зеркало 13 устанавливают перед окном 15 так, чтобы поле зрения трубы было равномерно освещено, затем зеркало закрепляют винтом 16. Вращая маховичок 10, находят границу раздела света и тени, маховичком 11 устраняют ее окрашенность. Точно совмещая границу раздела с перекрестием сетки, снимают отсчет по шкале показателей преломления. Индексом для отсчета служит неподвижный визирный штрих сетки. Целые, десятые, сотые и тысячные доли значения показателя преломления отсчитываются по шкале.

По окончании измерений тщательно вытирают рабочие поверхности блока Аббе мягкой тряпочкой или фильтровальной бумагой. Полированную грань измерительной призмы надо вытирать очень осторожно, чтобы не повредить полировку. Затем призмы промывают спиртом или эфиром, протирают и оставляют блок на некоторое время открытым для просушки. После этого измерительную головку осторожно закрывают, и прибор накрывают футляром.

Для определения показателя преломления с помощью рефрактометра Аббе пользуются двумя методами: методом скользящего луча и методом полного внутреннего отражения.

Метод скользящего луча применяется для определения показателей преломления для прозрачных жидкостей. Ход луча при измерении данным методом представлен на рис. 6, а ход луча в призмах рефрактометра представлен на рис. 7.

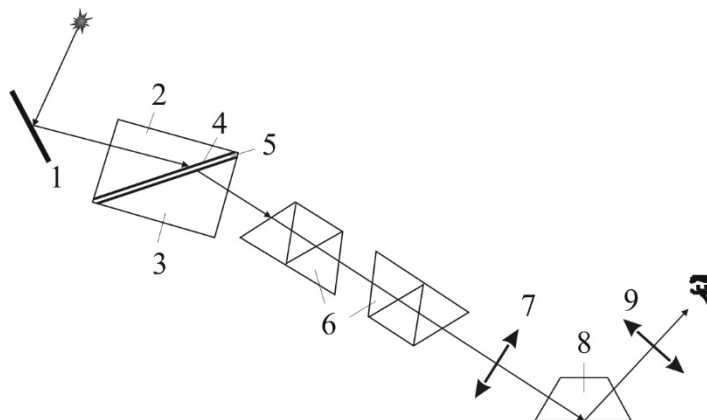


Рис. 6. Ход луча в рефрактометре ИРФ-22.

1 – осветительное зеркало, 2 – вспомогательная (откидная) призма, 3 – измерительная призма, 4 – матовая поверхность, 5 – исследуемое вещество, 6 – призмы компенсатора, 7 – объектив зрительной трубы, 8 – обращающая призма, 9 – окуляр зрительной трубы.

Свет от источника проникает во вспомогательную призму Π_1 сквозь грань АВ, затем рассеивается на ее матовой поверхности АС. Далее свет проходит сквозь плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает под всевозможными углами на грань DE измерительной призмы. Скользящему лучу, угол падения Q которого на границе жидкость – измерительная призма $\approx 90^\circ$, соответствует предельный угол преломления r_{np} , который и определяет границу распространения света в призме.

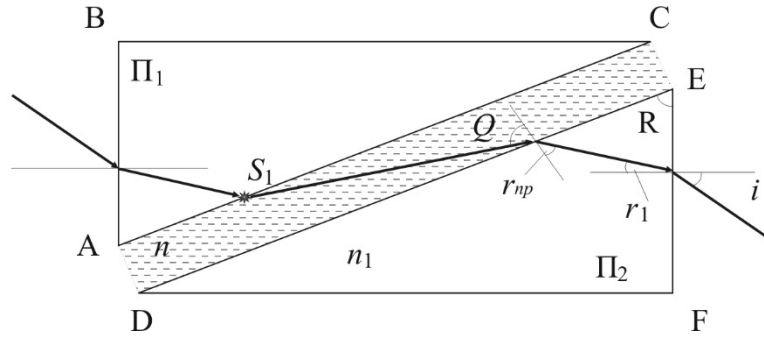


Рис. 7. Ход луча в призмах рефрактометра ИРФ-22

Рассмотрим прохождение света через грань EF измерительной призмы Π_2 . Как видно из рис. 7 применяя дважды закон преломления на гранях DE и EF, можно получить два соотношения:

$$\frac{\sin Q}{\sin r} = \frac{n_{np2}}{n_{жс}}, \quad (8)$$

$$\frac{\sin r_1}{\sin i} = \frac{n_{возд}}{n_{np2}}. \quad (9)$$

Поскольку $n_{возд} \gg 1$, то решая уравнения (8) и (9) получим, что показатель преломления жидкости $n_{жс}$ зависит от углов Q, r, r_1, i и определяется равенством вида:

$$n_{жс} = \frac{\sin r}{\sin r_1} \times \frac{\sin i}{\sin Q}. \quad (10)$$

Преломляющий угол R призмы Π_2 связан с углами r и r_1 равенством:

$$R = r + r_1. \quad (11)$$

Задав углу Q максимальное значение $Q_{\max} = \frac{p}{2}$ (луч S_1S_2 становится "скользящим"), из выражения (8) следует, что r тоже будет иметь максимальное значение: $r = r_{\max}$. $r_{\max}$ соответствуют минимальные значения углов r_1 и i , т.е. $r_{1\min}$ и $i_{\min}$. С учетом вышеописанного, а также выражая из (11) r и подставляя в (10) получим:

$$\begin{aligned} n_{жс} &= \frac{\sin i_{\min}}{\sin r_{1\min}} \times \sin(R - r_{1\min}) = \sin i_{\min} \times \frac{\sin R}{\sin r_{1\min}} \times \cos r_{1\min} - \cos R \times \sin i_{\min} = \\ &= \sin i_{\min} \times \sin R \sqrt{\frac{1}{\sin^2 r_{1\min}} - 1} - \cos R \times \sin i_{\min} \end{aligned}$$

Т.к. $\frac{\sin i_{\min}}{\sin r_{1\min}} = n_{np2}$, то выражение для $n_{жс}$ запишем в виде:

$$n_{жс} = \sin R \sqrt{n_{np2}^2 - \sin^2 i_{\min}} - \cos R \times \sin i_{\min}. \quad (12)$$

Таким образом, для определения показателя преломления исследуемой жидкости $n_{жс}$ необходимо знать значение $i_{\min}$ – угла выхода предельного луча из Π_2 в воздух.

Лучи выходят из грани EF под разными углами, значения которых лежат в пределах от 90° до наименьшего угла $i_{\min}$, значение последнего можно определить, используя соотношение (12).

Если на пути лучей, выходящих из грани EF под разными углами, поставить зрительную трубу, установленную на бесконечность, то в ее фокальной плоскости будет наблюдаться резкая граница света и темноты. При этом лучи, углы выхода которых меньше $i_{\min}$, распространяться не

будут. Также в фокальной плоскости зрительной трубы находится шкала величин показателя преломления и указатели (перекрестия). В окуляре зрительной трубы ((9) на рис. 6) можно увидеть лишь часть шкалы и часть сфокусированных лучей, однако, вращая измерительный блок Аббе и тем самым изменяя наклон предельного пучка лучей относительно оси зрительной трубы, можно добиться того, чтобы в поле зрения окуляра оказалась граница света и темноты и при этом совпала с перекрестием.

Граница раздела света и темноты при этом положении зрительной трубы соответствует направлению выхода лучей под наименьшим углом i_m . В этом случае нижняя половина поля зрения в окуляре рефрактометра будет соответствовать направлениям лучей, который выходят из призмы под углами большими, чем i_m , а верхняя – меньшими, чем i_m .

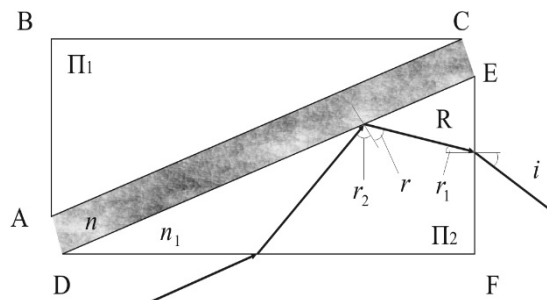
Как показано выше показатель преломления исследуемой жидкости связан с наименьшим углом i_m соотношением (12), однако для определения показателя преломления жидкости с помощью рефрактометра ИРФ-22 нет необходимости пользоваться данной формулой, поскольку отсчетная шкала уже проградуирована в значениях n с учетом (12).

Одной из особенностей рефрактометра ИРФ-22 является то, что для проведения измерений используется белый свет.

Так как источник света не является монохроматичным, то вследствие дисперсии света граница света и тени оказывается размытой и окрашенной. Для устранения этого эффекта на пути лучей, выходящих из призмы Π_2 , помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор состоит из двух одинаковых дисперсионных призм прямого видения – призм Амичи ((6) на рис. 6). Призма Амичи состоит из трех призм с различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы подобраны таким образом, чтобы луч с длиной волны $5893 \text{ \AA}$ не испытывал отклонения. В то время как лучи с другими длинами волн отклоняются в ту или иную сторону. Если призмы Амичи расположены как показано на рис. 6, то их дисперсия равна нулю, поскольку дисперсия одной из призм скомпенсирована дисперсией другой. Если повернуть одну из призм Амичи вокруг оптической оси на 180° относительно другой, то полная дисперсия станет равной удвоенному значению одной призмы (при равных дисперсиях призм). Таким образом, в зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора может изменяться от нуля до удвоенного значения дисперсии каждой из призм. Вращением ручки компенсатора добиваются резкого изображения границы света и темноты, положение которой при этом соответствует значению показателя преломления для желтой линии натрия D ($5893 \text{ \AA}$).

Метод полного внутреннего отражения применяется для определения показателя преломления темных, мутных и окрашенных растворов. Ход лучей при использовании данного метода представлен на рис. 8.

Свет от источника проходит сквозь матовую поверхность грани DF призмы Π_2 . Затем рассеивается на этой грани и под всевозможными углами падает на границу раздела стекло-жидкость. При этом если $n_2 > n_1$ будет происходить полное внутренне отражение, если $n_2 < n_1$ – свет отражается частично. В окуляре зрительной трубы будет наблюдаться резкая граница раздела между светом и полутенью.



Поскольку условия, которые опрееляют величину предельного угла i в методе скользящего луча, и в методе полного внутреннего отражения, совпадают, то положение границы

раздела света и темноты в обоих случаях оказывается одинаковым.

Необходимо отметить, что рефрактометр Аббе может быть использован для определения показателя преломления твердых тел. Для этого применимы как метод скользящего луча, так и метод полного отражения.

Порядок выполнения работы.

1. Прежде чем приступить к определению показателя преломления исследуемой жидкости необходимо убедиться в правильности работы рефрактометра. Такую проверку проще всего выполнить, измерив показатель преломления вещества с известным показателем преломления. В качестве такого вещества будем использовать дистиллированную воду, показатель преломления которой равен 1,333.

Откройте предназначенное для подсветки шкалы зеркало и направьте свет от окна в лаборатории или от осветительной лампы на шкалу показателей преломления, с помощью окуляра добейтесь резкого изображения измерительной шкалы и перекрестия. Поднимите вспомогательную призму и с помощью пипетки нанесите несколько капель дистиллированной воды на измерительную призму. Осторожно опустите первую призму в исходное положение, посмотрите в окуляр и убедитесь в том, что вода полностью заполнила зазор между измерительной и осветительной призмами. Затем установите осветительное зеркало таким образом, чтобы поле зрения трубы было равномерно освещено, закрепите зеркало в данном положении. Вращая блок измерительной и вспомогательной призм, найдите в поле зрения окуляра границу света и темноты. Устраните окрашенность последней с помощью компенсатора. Совместите точку перекрестия с границей света и тени и по шкале показателей преломления определите показатель преломления дистиллированной воды. При условии, что рефрактометр исправен, для дистиллированной воды должно получиться значение показателя преломления указанное выше, то есть 1,333. Если же полученное значение отличается от теоретического следует найти поправку к шкале $Dn = n_{изм.} - 1,333$. Внесите полученную поправку в таблицу 1 отчета и учитывайте ее при дальнейших измерениях.

2. Не забывайте, что рабочие поверхности вспомогательной и измерительной призм легко повредить, поэтому при работе с ними необходимо соблюдать осторожность. Для получения правильных значений показателя преломления после каждого опыта необходимо обязательно тщательно вытирать рабочие поверхности обеих призм мягкой тряпочкой или фильтрованной бумагой. Вытирая поверхность измерительной призмы будьте внимательны, можно повредить полировку.

3. Измерьте показатели преломления растворов поваренной соли, концентрация которых известна. Результаты измерений занесите в таблицу 2 отчета. Определите истинные значения показателей преломления исследуемых растворов, эти данные также внесите в таблицу 2.

4. Используя данные таблицы 2, постройте график зависимости показателя преломления n от концентрации C .

5. Определите показатель преломления раствора поваренной соли с неизвестной концентрацией. Используя график определить неизвестную концентрацию. Полученный результат внесите в таблицу 2. Узнайте у лаборанта неизвестную концентрацию, сделайте выводы.

Контрольные вопросы.

1. Почему при переходе от законов физической оптики к законам геометрической оптики существенно $\lambda \rightarrow 0$?
2. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
3. Что называется абсолютным и относительным показателем преломления?
4. От чего зависит абсолютный показатель преломления?
5. Зависит ли показатель преломления от угла падения? Угла преломления? Угла отражения? Скорости распространения света в среде?
6. Что такое полное внутреннее отражение? Условие полного внутреннего отражения.
7. В чем заключается физический смысл показателя преломления?

Лабораторная работа 13

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Цель работы: углубить представление о явлении дифракции, границах и условиях ее проявления; изучить практическое применение дифракции в спектральных измерениях.

Теоретическая часть

Явление *дифракции* состоит в свойстве волн отклоняться от прямолинейного распространения – «загибаться» в область геометрической тени. Явление дифракции характерно для волн любой природы и становится легко наблюдаемым в лабораторных условиях тогда, когда размеры препятствий или отверстий соизмеримы с длиной волны. (Для видимого света длины волн лежат в диапазоне 450-750 нм, поэтому дифракционные явления начинают наблюдаться на щелях и преградах размерами в доли миллиметра.)

Причину дифракции волн как и причину прямолинейного распространения можно понять из принципа Гюйгенса-Френеля, который заключается в следующем:

а) всякую точку на фронте волны можно рассматривать как источник вторичных волн (принцип Гюйгенса в исходном виде);

б) результат распространения света в любой точке пространства определяется интерференцией вторичных волн (дополнение Френеля).

Дифракция на одной щели

Пусть пучок монохроматического света с длиной волны λ падает на непрозрачную ширму $Ш$ (рис. 1), имеющую щель b , ширина которой AB значительно меньше ее длины. За ширмой стоит линза L , в ее фокальной плоскости помещен экран $Э$.

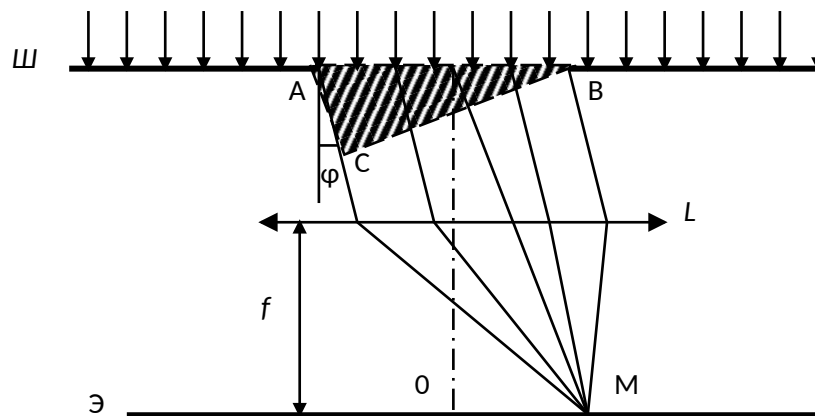
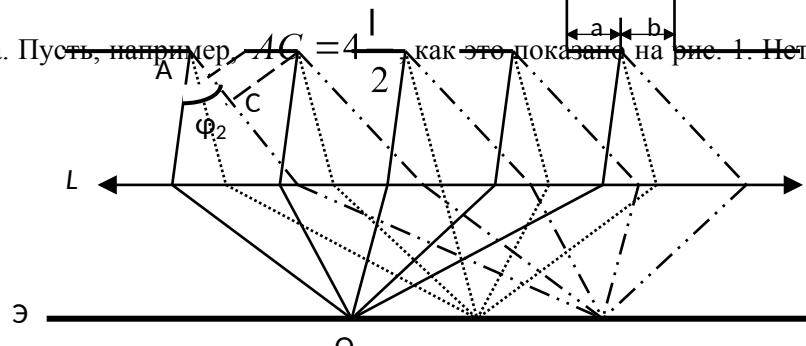


Рис. 1

В соответствии с принципом Гюйгенса все точки волнового фронта AB являются источниками вторичных волн, направление распространения которых за ширмой принимают любые значения от -90° до $+90^\circ$. Нетрудно показать, что линза не создает разности хода для лучей, проходящих ее центральную или периферическую части. Это свойство линзы называется *таутохронизмом*. Поэтому освещенность экрана в его любой точке определяется той разностью хода лучей, которая возникает между ширмой и линзой и зависит от величины λ и AC .

При любой ширине щели лучи, падающие на линзу параллельно ее оптической оси, приходят в главный фокус O с нулевой разностью хода, поэтому в этой точке экрана всегда наблюдается максимум освещенности. Т.о. создается т.н. *главный максимум освещенности* – *максимум нулевого порядка*.

Выберем теперь пучок параллельных лучей, отклоненных от исходного направления на такой угол φ , при котором разность хода крайних лучей AC окажется кратной полуволне падающего света. Пусть, например, $AC = 4\lambda$, как это показано на рис. 1. Нетрудно видеть, что



в этом случае на ширине щели AB помещается четыре зоны Френеля и тогда, попарно гася друг друга, они дают в точке M экрана минимум освещенности. Очевидно, что для всех углов j , когда в AB помещается четное число полузон, в соответствующей точке экрана наблюдается минимум освещенности. При разности хода $AC = AB \sin j = b \sin j$ это условие можно выразить в виде соотношения:

$$b \sin j = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (1)$$

где $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Рассуждая аналогично, можно показать, что максимуму освещенности экрана соответствуют лучи, угол отклонения j которых подчиняется условию:

$$b \sin j = (2k + 1)\lambda \quad (2)$$

т.е. в щели помещается нечетное количество зон Френеля.

Т.о., падающий на узкую щель параллельный световой пучок может быть обнаружен в области геометрической тени в виде системы полос, параллельных щели и симметричных относительно нулевого максимума. Распределение интенсивности освещенности I_j в главном и последующих максимумах соответствует пропорции 1:0,04:0,016:0,011 и т.д. и зависит от ширины щели.

Если на щель падает белый свет, то светлые полосы дифракционных максимумов приобретают радужную окраску. В соответствии с формулой (2) угол отклонения «красной» (длинноволновой) части белого света больше, чем коротковолновой, поэтому чередование цветов в полосах, если считать от нулевого максимума, идет от фиолетового к красному. Нулевой максимум остается белым.

Дифракционная решетка

Дифракционной решеткой называется система параллельных щелей одинаковой ширины и расположенных на строго одинаковом расстоянии друг от друга.

Пусть b – ширина щели, a – ширина непрозрачного участка (рис. 2). Точки щелей, расположенные на расстоянии $(b+a)$ друг от друга, называются *соответственными*, величина $d=(b+a)$ – *периодом решетки*, величина $n = \frac{1}{d}$ представляет число штрихов на единице длины,

обычно она имеет значение в пределах от сотен до тысяч штрихов на миллиметр.

Пусть на решетку, состоящую из N щелей, нормально падает пучок монохроматического света с длиной волны λ . Каждую щель можно рассматривать как отдельный источник и применить рассуждения предыдущего параграфа. В этом случае мы имеем следующее:

1. Лучи, падающие на линзу параллельно ее оптической оси, не имеют разности хода, поэтому в главном фокусе линзы всегда наблюдается максимум освещенности. Это – *главный* или *нулевой максимум*.

2. Лучи, подчиняющиеся условию (1), дают на экране темную полосу, т.к. под этими углами j каждая щель дает минимум освещенности. Это – *главные минимумы*.

3. Если угол отклонения соответствует условию (2), т.е. каждая щель в отдельности дает на экране максимум, то возможны два случая:

свет, идущий от соответственных точек соседних щелей, находится в одной фазе. В этом случае на экране происходит суммирование интенсивностей света всех щелей, и в точке экрана наблюдается максимум освещенности;

свет, идущий от соответственных точек соседних щелей, находится в противоположных фазах. В этом случае на экране происходит суммирование знакопеременяющегося ряда интенсивностей, и на экране возникают *дополнительные минимумы*. Они располагаются между главными экстремумами, а их количество зависит от количества щелей решетки.

Наибольший интерес представляет третий случай, поэтому рассмотрим его подробнее.

Очевидно, что усиление света, прошедшего сквозь решетку, происходит в тех направлениях, для которых разность хода интерферирующих лучей от соответственных точек щелей равна четному числу полуволен, именно тогда они находятся в одной фазе. Как следует из рис. 2, этому условию удовлетворяет выражение:

$$AC = d \sin j_2 = kl, \text{ где } k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Т.о. выражение

$$d \sin j = kl \tag{3}$$

является *условием главных максимумов дифракционной решетки*. Сама дифракционная картина имеет вид полос, параллельных щелям решетки и располагаются симметрично относительно нулевого максимума.

Если же направление отклонения таково, что выполняется соотношение

$$d \sin j = kl + \frac{p}{N}l \tag{4}$$

где N – число штрихов решетки,

k – порядок главного максимума

$p=1, 2, 3, \dots, (N-1)$,

то в соответствующем месте экрана *возникают дополнительные минимумы*. Их количество равно $(N-1)$, угловое расстояние между ними тем меньше, чем больше N .

Увеличение общего числа щелей решетки приводит к усилению интенсивности освещенности светлых полос (главных максимумов) на экране и одновременно с этим существенно сужает эти полосы (за счет роста числа минимумов).

При освещении решетки белым светом светлые полосы имеют радужную окраску. В соответствии с выражением (3) к центру картины обращены фиолетовая часть радуги. Эта способность решетки разлагать белый свет в спектр обусловила широкое применение ее в спектральных приборах.

Основными характеристиками любого спектрального прибора являются дисперсия и разрешающая способность.

Угловой дисперсией называется величина углового расстояния между линиями, отличающимися по длине волны на единицу:

$$D = \frac{dj}{dl} \tag{5}$$

Дифференцируя обе части выражения (3), получим:

$$d \cos j \, dj = k \, dl, \text{ откуда } D = \frac{k}{d \cos j} \tag{6}$$

Из (6) видно, что при малых углах j дисперсия возрастает с увеличением порядка спектра:

$$D = k \frac{1}{d} \tag{7}$$

Часто положение линии спектра наблюдается на экране или фотопластинке, в этих случаях необходимо знать линейную дисперсию.

Линейной дисперсией называется величина $\frac{dl}{d\lambda}$, где l – линейное расстояние на экране или

фотопластинке между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на единицу. Линейная дисперсия связана с угловой соотношением:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \frac{dj}{d\lambda}, \tag{8}$$

где f – фокусное расстояние линзы, собирающей дифрагирующие лучи на экране.

Реальное восприятие двух близких спектральных линий зависит от ширины и расстояния между ними.

Две спектральные линии считаются разрешенными, если главный максимум одной из них приходится на первый дополнительный минимум другой (*критерий Рэлея*).

Разрешающую способность спектрального прибора R можно определить как безразмерную величину:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (9)$$

где $\Delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, при которой эти линии воспринимаются раздельно. Разрешающая способность дифракционной решетки пропорциональна порядку спектра k и числу щелей N . Применяя принцип Рэлея, можно показать, что

$$R = kN \quad (10)$$

Дифракционные решетки выполняются на стекле (с ними работают в проходящем свете) или на металле (с ними работают в отраженном свете), нанося параллельные штрихи через строго определенные интервалы с помощью делительной машины. Применяемые в учебных лабораториях решетки являются отпечатками гравированных решеток (т.н. реплики), они изготавливаются из пластмассы. Дифракционные решетки с небольшим количеством штрихов выполняются фотографическим способом.

Выполнение работы

1. Дифракционная решетка.

№ п/п	N	I/I ₀	Зависимость интенсивности от N
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

№ п/п	D=N·d	λ, нм	ΔΘ=
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

№ п/п	Ширина щелей, b	Число главных максимумов
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

Выводы:

2. Угловая дисперсия.

Параметры решетки: $b = \dots$ мкм, $d = \dots$ мкм, $N = 100$

Провести наблюдение за угловым расстоянием $\Delta\Theta$ между двумя желтыми линиями в максимумах 1-го, 2-го и 3-го порядков.

$\Delta\Theta_1 / \Delta\lambda \gg m/d = \dots$;

$\Delta\Theta_2 / \Delta\lambda \gg m/d = \dots$;

$$\Delta\Theta_3 / \Delta\lambda \approx m/d = \dots\dots$$

Вывод:

3. Дисперсионная область.

Параметры решетки: $b=10$ мкм, $d=100$ мкм, $N=100$

№ п/п	λ , нм	$\Delta\lambda$, нм	Номера перекрывающихся порядков.	Выполняется ли условие $\Delta\lambda = \lambda/m$?
1.		200		
2.		150		
3.		100		
4.		50		

Вывод:

4. Разрешающая способность.

Параметры решетки: $b=10$ мкм, $d=100$ мкм

№ п/п	Число щелей N	λ	$R = \lambda/\Delta\lambda$	Порядок разрешения
1.	8			
2.				
3.				
1.	100			
2.				
3.				

Вывод:

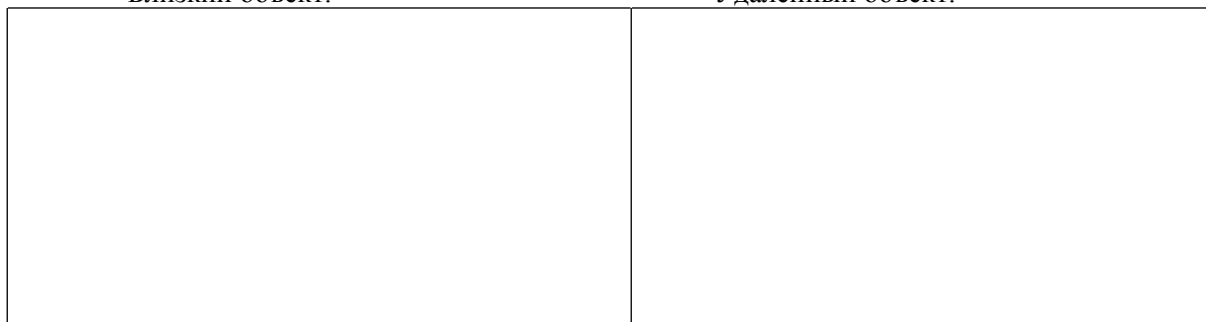
5. Оптические инструменты.

1. Линза.

Схема опыта.

Близкий объект.

Удаленный объект.



Что происходит с размером дифракционного изображения при увеличении размера диафрагмы?

2. Телескоп.

Схема опыта.



Как зависит предел разрешения телескопа от размеров объектива?

3. Микроскоп.

Схема опыта.



Предел разрешения микроскопа.

№ п/п	λ , нм	$\sin u$	n	Предел разрешения $l' =$
1.				
2.				
3.				

Как зависит предел разрешения от длины волны и от угла?

Лабораторная работа 14

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ЗАКОН МАЛЮСА.

Цель работы: определить плоскость поляризации лазерного луча и проверить выполнимость закона Малюса.

Оборудование и материалы: He-Ne лазер мощностью 1,0 мВт; оптическая скамья; поляризатор в держателе с поворотным устройством с радиально нанесенными делениями; фотоэлемент; цифровой мультиметр.

Для получения допуска к работе необходимо:

- иметь представление об электромагнитной теории света, поляризации света, знать, что такое поляризатор и анализатор, формулировать закон Малюса;
- знать элементы установки и уметь проводить ее юстировку.

Для получения зачета необходимо:

- уметь определять плоскость поляризации лазерного луча, проверить выполнимость закона Малюса, уметь выводить закон Малюса;
- знать что такое степень поляризации и какая она бывает.

Теоретическая подготовка к работе.

Естественный и поляризованный свет.

Естественный свет представляет собой набор большого числа близких по амплитуде световых волн, в которых направления колебаний электрического (и, соответственно, магнитного) векторов распределены случайным (равновероятным) образом. Равномерное распределение направлений колебаний векторов $\vec{E}$ (рис. 9.1а) объясняется большим числом спонтанно испускающих свет атомов вещества, а равенство амплитудных значений векторов $\vec{E}$ – одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого атома. Излучение обычных источников света (например, Солнца, ламп накаливания и т. п.) не поляризовано. Свет таких источников в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора (вектора $\vec{E}$). При спонтанном излучении различные атомы источника испускают отдельные цуги волн независимо друг от друга в случайные моменты времени. Процесс излучения отдельного атома длится $\gg 10^{-8}$ с. Фазы колебаний и направления колебаний вектора $\vec{E}$ в излучении различных атомов не скоррелированы друг с другом. Поэтому в результирующей световой волне вектор $\vec{E}$ беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными.

Свет, в котором направления колебаний вектора $\vec{E}$ упорядочены каким-либо образом, называют частично поляризованным (рис. 9.1б). Если электрический вектор колеблется вдоль некоторого фиксированного направления, то такой свет называется линейно поляризованным или плоско поляризованным (рис. 9.1в). Плоскость, в которой все время лежит вектор $\vec{E}$, а также расположен волновой вектор $\vec{k}$, называется плоскостью колебаний. При этом плоскостью поляризации принято называть плоскость, в которой колеблется магнитный вектор световой волны.

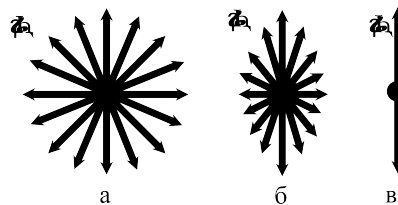


Рис. 9.1. Колебания вектора напряженности в естественном (а), частично-поляризованном (б) и плоско поляризованном свете.

В общем случае, если взять две электромагнитные волны, линейно поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, то при сложении они дают волну *эллиптически-*

поляризованную (вектор $\vec{E}$ изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной световому лучу).

Колебания в некоторой точке пространства можно записать в виде:

$$E_x = a_1 \cos(\omega t + j_1) \text{ и } E_y = a_2 \cos(\omega t + j_2), \quad (9.1)$$

где a_1 и a_2 – амплитуды колебаний электрического поля, j_1 и j_2 – начальные фазы колебаний.

Результирующее колебание $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$. Уравнения (9.1) определяют траекторию, по которой перемещается конец результирующего вектора $\vec{E}$ в плоскости xu . Эти уравнения являются уравнением эллипса в параметрическом виде, исключив из них параметр t , получим уравнение траектории:

$$\frac{E_x^2}{a_1^2} + \frac{E_y^2}{a_2^2} - 2 \frac{E_x E_y}{a_1 a_2} \cos \Delta j = \sin^2 \Delta j \quad (9.2)$$

В эллиптически поляризованной световой волне в любой плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, конец результирующего вектора за один период колебания обегает эллипс, который называется эллипсом поляризации (рис. 9.2).

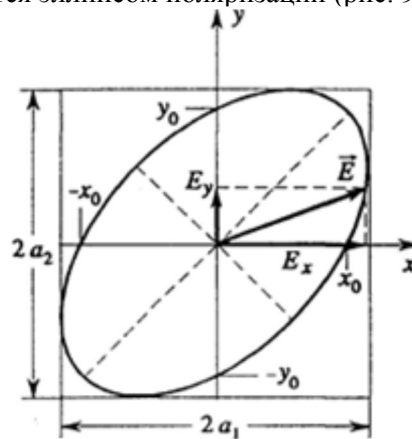


Рис. 9.2. Эллипс поляризации.

Если амплитуды складываемых волн равны между собой, то вид эллипса зависит только от разности фаз этих волн. При разности фаз $\frac{\pi}{2}$ эллипс превращается в круг, и волна называется *поляризованной по кругу* или *циркулярно поляризованной*. При разности фаз 0 или π эллипс превращается в прямую линию и волна будет линейно поляризованной. Таким образом, линейная и круговая поляризации представляют собой частный случай эллиптической поляризации.

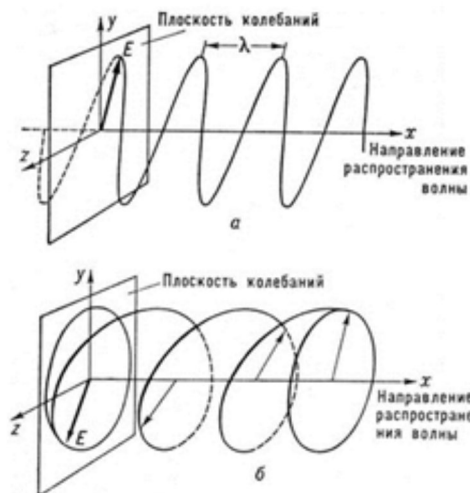


Рис. 9.3 . Распространение линейно-поляризованной и эллиптически-поляризованной волн.

Получение поляризованного света.

Получить поляризованный свет можно несколькими способами.

Первый способ – с помощью отражения от диэлектрика (рис. 9.4). Если направить пучок естественного света на границу раздела двух диэлектриков (например, воздух – стекло), то часть света отражается, а часть, преломляясь, распространяется во второй среде. При этом получается свет только частично поляризованный, но при некотором угле падения световой волны поляризация делается полной. Это происходит в том случае, когда тангенс угла падения равен показателю преломления вещества, из которого сделано вещество (закон Брюстера):

$$\operatorname{tg} i_{\text{Бр}} = n_{21} \quad (9.3)$$

где n_{21} – показатель преломления второй среды по отношению к первой.

Этот угол называется углом полной поляризации и для стекла равен 57° . При полной поляризации плоскость поляризации отраженной волны перпендикулярна к ее плоскости падения.



Рис. 9.4. Поляризация при отражении от диэлектрика.

Второй способ – с помощью преломления в стеклянной пластинке. В данном случае поляризация всегда неполная. В то время как отраженная волна при угле полной поляризации целиком поляризована, в преломленной волне поляризованного света будет лишь столько, сколько его имеется в отраженном пучке. Например, если взять стекло, то из пучка, падающего на поверхность стекла под углом поляризации, отражается только 1/7 часть, а 6/7 проходят через стекло, но в этом последнем пучке поляризованного света тоже только 1/7, а остальные 5/7 остаются естественным светом. Чтобы достичь большей степени поляризации в преломленном световом пучке, его пропускают под углом поляризации ($i_{\text{пол}} = 57^\circ$) через стопу тонких стеклянных пластинок, наложенных одна на другую (стопа Столетова) (Рис. 9.5).

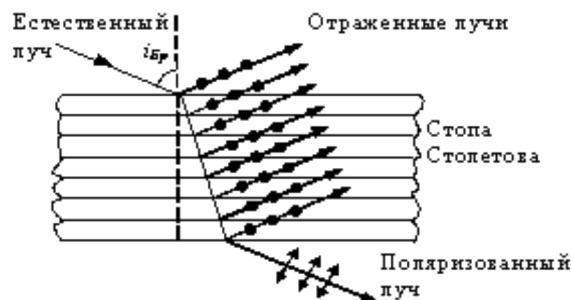


Рис. 9.5. Стопа Столетова.

Третий способ – с помощью поляризационных призм. В некоторых кристаллах (исландский шпат, кварц и др.) показатель преломления зависит от состояния поляризации света. Естественный свет при прохождении таких кристаллов разделяется на два луча, с взаимно перпендикулярным направлением поляризации. Такие кристаллы называют двоякопреломляющими. Один из лучей подчиняется закону преломления и называется обыкновенным, а другой не подчиняется и поэтому называется необыкновенным. Призмы из двоякопреломляющих кристаллов склеивают таким образом, чтобы через них проходил только один из лучей, а второй отклонялся в сторону на значительный угол. Тогда на выходе из призмы свет становится плоско поляризованным

В качестве примера рассмотрим устройство призмы Николя (николь). Она изготавливается из кристалла исландского шпата. По линии AA' призма $A'A'C$ разрезается и склеивается канадским бальзамом (рис. 9.6). Если естественная световая волна падает на одну из коротких граней николя под углом не более 33° , то она всегда разделяется в кристалле на обыкновенную (o) и необыкновенную (e) волны, причем необыкновенная волна проходит через весь кристалл, тогда как обыкновенная, достигая канадского бальзама, претерпевает полное внутреннее отражение ($n_e < n_{\text{кб}} < n_o$). Таким образом, николь пропускает только необыкновенную волну, колебания которой совершаются в плоскости главного сечения.

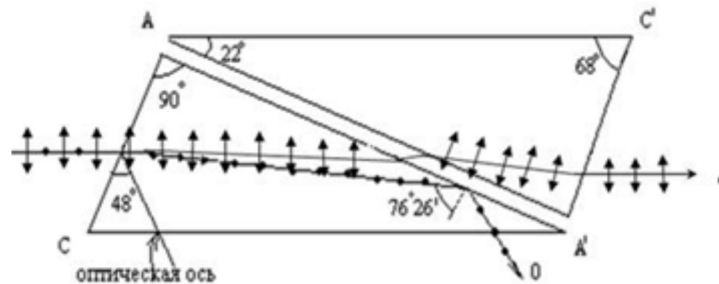


Рис. 9.6. Ход лучей в призме Николя.

Четвертый способ – с помощью кристаллов, обладающих свойством дихроизма (например, турмалин). У некоторых двупреломляющих кристаллов один из лучей интенсивно поглощается, тогда прошедший луч оказывается плоско поляризованным. В настоящее время дихроизм создают искусственно, внедряя в полимерные пленки оптически анизотропные поглощающие микрокристаллы, которые после 6-10 кратного вытягивания пленки ориентируются вдоль оси вытягивания. Такие устройства носят название поляроидов и широко применяются в жидкокристаллических индикаторах (часы, калькуляторы, дисплеи и т.д.).

Анализ поляризованного света. Закон Малюса.

Всякий прибор, служащий для получения поляризованного света, называется поляризатором. Плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$ в световой волне, прошедшей через поляризатор, называется плоскостью пропускания или главной плоскостью поляризатора.

Поляризатор, использующийся для определения направления поляризации света, называют анализатором.

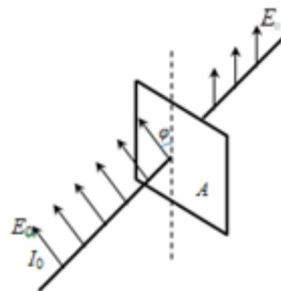


Рис. 9.7. Прохождение линейно поляризованного света через анализатор.

Если на анализатор падает плоско поляризованный свет амплитудой E_0 и интенсивности I_0 ($I_0 \sim E_0^2$), плоскость поляризации которого составляет угол j с плоскостью пропускания анализатора, то падающее электромагнитное колебание можно разложить на две составляющие $E_{\text{парал}} = E_0 \cos j$ и $E_{\text{перп}} = E_0 \sin j$ параллельных и перпендикулярных плоскости анализатора пропускания соответственно.

Сквозь анализатор пройдет составляющая параллельная плоскости анализатора, то есть составляющая $E_{\text{парал}} = E_0 \cos j$, а перпендикулярная составляющая будет задержана

анализатором. Тогда интенсивность прошедшего через анализатор света будет равна (закон Малюса):

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (9.4)$$

Закон Малюса: интенсивность света, прошедшего через поляризатор, прямо пропорциональна произведению интенсивности падающего плоско поляризованного света I_0 и квадрату косинуса угла между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью пропускания анализатора.

При падении на поляризатор естественного света интенсивность прошедшего света I_0 равна половине интенсивности естественного $I_{\text{ест}}$, и если на пути поставить анализатор, через него пройдет свет с интенсивностью:

$$I = \frac{I_{\text{ест}}}{2} \cos^2 \varphi$$

Если естественный свет падает на несовершенный поляризатор (поляризатор, который частично задерживает колебания вектора $\vec{E}$, перпендикулярные к его плоскости пропускания), то на выходе из такого поляризатора получается частично поляризованный свет, т.е. свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного и линейно поляризованного света.

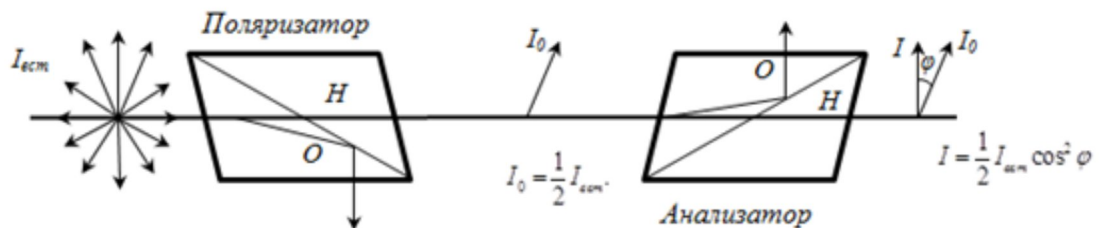


Рис.9.8. Прохождение естественного света через систему поляризатора и анализатора.

Если пропускать частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении поляризатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет меняться в пределах от I_{max} до I_{min} , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол, равный $\pi/2$. За один полный поворот поляризатора на 360° интенсивность проходящего света два раза будет достигать своего максимального и два раза минимального значений.

Степенью поляризации частично поляризованного света называется величина P , равная:

$$P = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (9.5)$$

где I_{max} до I_{min} — максимальная и минимальная компоненты интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора $\vec{E}$.

Для линейно поляризованного света $I_{\text{min}} = 0$ и $P = 1$; для естественного света $I_{\text{max}} = I_{\text{min}}$, поэтому $P = 0$.

Анализ частично поляризованного света.

Существуют оптические элементы, преобразующие форму поляризации проходящего через них монохроматического поляризованного пучка света без потери интенсивности и поляризации, которые называются фазовыми или волновыми пластинками $(\frac{1}{2}, \frac{1}{4})$. Совместно с линейными

поляризаторами фазовые пластинки применяются для получения или анализа циркулярно и эллиптически поляризованного света. Большинство фазовых пластинок хроматические, т.е. сдвиг фаз в них зависит от длины волны света. Различают линейные, круговые и эллиптические фазовые пластинки в зависимости от того, какая из форм поляризации может пройти без изменения через

данную фазовую пластинку при ее соответствующей ориентации. Определить вид поляризации можно, воспользовавшись следующим алгоритмом (рис. 9.9)

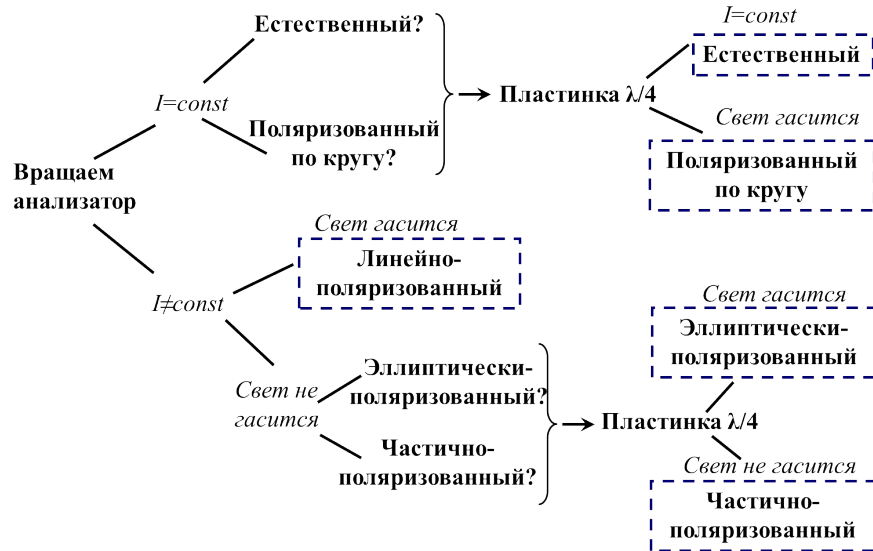


Рис. 9.9. Анализ частично поляризованного света.

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки представлен на рис. 9.10. В состав установки входят: He-Ne лазер мощностью 1,0 мВт (используется как источник света); оптическая скамья длиной 60 см; поляризатор в держателе с поворотным устройством с радиально нанесенными делениями, расположенными через равные угловые промежутки с шагом в 5° (используется как анализатор); фотоэлемент; цифровой мультиметр, используемый для измерения фототока.

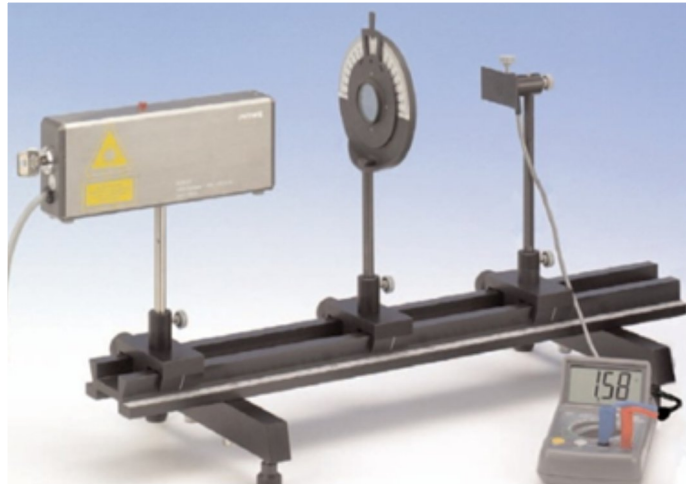


Рис. 9.10. Экспериментальная установка.

Юстировка экспериментальной установки и ход проведения эксперимента

1. Соберите экспериментальную установку согласно рис. 9.10. Убедитесь, что свет, проходящий через поляризационный светофильтр, равномерно освещает фотоэлемент.
2. Если эксперимент проводится в незатемненном помещении, то для дальнейшей корректировки результатов необходимо определить значение нулевого тока I_0 с выключенным лазером. Если значение $I_0 \neq 0$, необходимо это учесть в результатах измерений как систематическую ошибку.
3. Включите лазер на 5-10 мин, чтобы он прогрелся, для стабилизации интенсивности его излучения.
4. Вращая поляризационный светофильтр с шагом 5° от -90° до $+90^\circ$, определите с помощью цифрового мультиметра значение величины фототока в фотоэлементе.

5. Постройте зависимость величины силы тока I в фотоэлементе (после корректировки фона) как функции углового положения разрешенной плоскости поляризации анализатора α (I от α). По максимуму интенсивности определите плоскость поляризации α_0 лазерного луча, данные оформите в виде таблицы 9.1.

Таблица 9.1

α , град	I , мА	$I_{\max}$, мА	α_0 , град	$j = \alpha - \alpha_0$, град	$\cos^2 j$	$\frac{I}{I_{\max}}$, отн. ед.
-90						
-85						
...						
+85						
+90						

6. Постройте график зависимости относительного значения величины фототока $\frac{I}{I_{\max}}$ от квадрата косинуса углового положения анализатора ($\cos^2 j$). Проверьте выполнение закона Малюса.
7. Используя формулу (9.5), рассчитайте степень поляризации лазерного излучения.

Контрольные вопросы

1. Что такое естественный свет?
2. Что называется плоскостью пропускания (или главной плоскостью поляризатора)?
3. Что такое поляризованный свет, каковы способы его получения?
4. Что такое линейно поляризованный свет?
5. Что такое частично поляризованный свет?
6. Получите закон Брюстера из формул Френеля для прохождения света через границу двух диэлектриков.
7. По какой формуле следует записать интенсивность света после прохождения поляризатора, если на поляризатор падал линейно поляризованный свет?
8. Как определить характер поляризации света, падающего на поляризатор?
9. Чему равна степень поляризации частично поляризованного света?

Лабораторная работа 15

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.

Цель работы: изучение закономерностей теплового излучения на примере излучения абсолютно твердого тела; установление зависимости мощности излучения нагретого тела от его температуры.

Оборудование: лампа накаливания, амперметр, вольтметр, источник постоянного напряжения.

Теоретическая часть

Тепловое (температурное) излучение - свечение тел, обусловленное нагреванием. Тепловое излучение является равновесным. Если нагретые (излучающие) тела поместить в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой, то через некоторое время (в результате непрерывного обмена энергией между телами и излучением, заполняющим полость) наступит равновесие, т.е. каждое тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать. При этом все тела в полости приобретут одинаковую температуру. Допустим, что по какой-либо причине одно из тел станет излучать энергии больше, чем поглощать. Если в единицу времени тело больше излучает, чем поглощает (или наоборот), то температура тела начнет понижаться (или повышаться). Так как это противоречит второму началу термодинамики, то отсюда следует, что, действительно, излучающие тела и заполняющее полость тепловое излучение находятся между собой в состоянии термодинамического равновесия. При этом равновесному тепловому излучению приписывается температура, равная температуре находящихся с ним в равновесии тел.

Энергию, излучаемую с единицы площади поверхности тела в единицу времени в интервале частот единичной ширины, называют *спектральной плотностью энергетической светимости*:

$$R_{n,T} = \frac{dW_{n,T}^{\text{изл}}}{dn}, \quad (1)$$

где $dW_{n,T}^{\text{изл}}$ - энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени (мощность излучения) с единицы площади поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu+dv$.

Спектральная плотность энергетической светимости в функции длины волны

$$\begin{aligned} R_{l,T} &= \frac{c}{l^2} R_{n,T}; \\ dW_{n,T}^{\text{изл}} &= R_{n,T} dn = R_{l,T} dl; \quad c = \ln; \\ \frac{dl}{dn} &= -\frac{c}{n^2} = -\frac{l^2}{c}, \end{aligned} \quad (2)$$

где знак минус указывает, что l уменьшается с возрастанием n .

Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно найти *энергетическую светимость* тела:

$$R_T = \int_0^\infty R_{n,T} dn = \int_0^\infty R_{l,T} dl, \quad (3)$$

где суммирование производится по всем частотам (длинам волн).

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется *спектральной поглощательной способностью*

$$A_{n,T} = \frac{dW_{n,T}^{\text{погл}}}{dW_{n,T}^{\text{изл}}}, \quad (4)$$

показывающей, какая доля энергии, переносимой за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от ν до $\nu+dv$ поглощается телом.

Тело, способное поглощать полностью при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты, называют черным. Тело, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, называют серым.

Спектральные поглощательные способности черного и серого тел:

$$A_{n,T} \leq 1, A_{n,T}^c = A_T = \text{const} < 1.$$

Идеальная модель черного тела - замкнутая полость с небольшим отверстием O , внутренняя поверхность которой зачернена (рис. 1). Луч света, попавший внутрь такой полости, испытывает многократные отражения от стенок, в результате чего интенсивность вышедшего излучения оказывается практически равной нулю. При размере отверстия, меньшем 0,1 диаметра полости, падающее излучение всех частот «полностью поглощается».

Тепловое излучение подчиняется закону Кирхгофа: отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры

$$\frac{R_{n,T}}{A_{n,T}} = r_{n,T}, \quad (5)$$

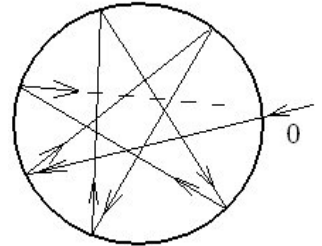


Рис. 1

где $r_{n,T}$ - универсальная функция Кирхгофа, т. е. не что иное, как спектральная плотность энергетической светимости черного тела.

Используя закон Кирхгофа (5), выражению для энергетической светимости тела (3) можно придать вид

$$R_T = \int_0^\infty A_{n,T} r_{n,T} dn. \quad (6)$$

Для серого тела

$$R_T^c = A_T \int_0^\infty r_{n,T} dn = \int_0^\infty A_{l,T} dl = A_T R_c, \quad (7)$$

где

$$R_c = \int_0^\infty r_{n,T} dn = \int_0^\infty r_{l,T} dl$$

- энергетическая светимость черного тела (зависит только от температуры)

Зависимость энергетической светимости от температуры определяется законом Стефана - Больцмана:

$$R_c = s T^4, \quad (8)$$

т.е. энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры; $s = 5,67051(19) \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4)$ - постоянная Стефана - Больцмана.

Энергетическая светимость серого тела

$$R_c^c = a_T s T^4, \quad (9)$$

где a_T - степень черноты серого тела.

Экспериментальные кривые зависимости $r_{n,T}$ от частоты ν и от длины волны λ для разных температур приведены на рис. 2 и 3, откуда следует, что распределение энергии в спектре черного тела неравномерно.

Согласно закону смещения Вина, длина волны λ_{max} соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре (рис. 3):

$$l_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (10)$$

где $b = 2,8978(1) \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{Ж}$ - постоянная Вина.

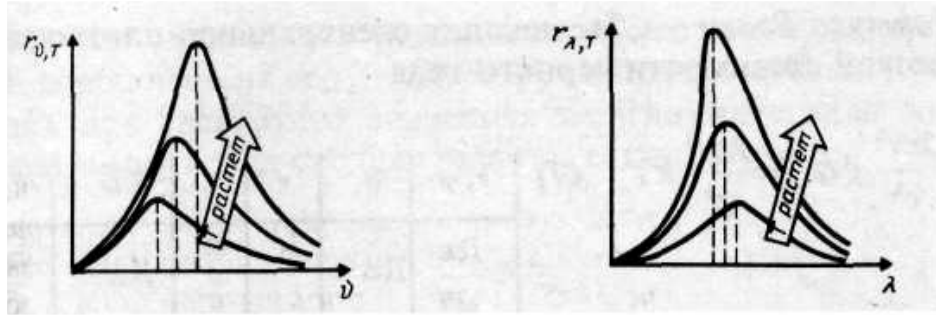


Рис. 2.

Рис. 3.

Зависимость максимальной плотности энергетической светимости черного тела от температуры

$$(r_{\lambda, T})_{\max} = CT^5, \quad (11)$$

где C – постоянная; $C = 1,3 \times 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{Ж}^5)$.

Формула Рэлея - Джинса для спектральной плотности энергетической светимости черного тела

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \hbar E \tilde{n} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \quad (12)$$

где $E = kT$ - средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν . В области больших частот формула Рэлея - Джинса резко расходится с экспериментом, а также с законом смещения Вина. Кроме того, попытка получить закон Стефана-Больцмана из этой формулы дает абсурдный результат.

В области больших частот хорошее согласие с опытом дает закон излучения Вина (формула Вина), полученный им из общих термодинамических соображений:

$$r_{\nu, T} = c\nu^3 A e^{-\frac{A\nu}{T}}, \quad (13)$$

где $r_{\nu, T}$ - спектральная плотность энергетической светимости черного тела, C и A – постоянные величины. В современных обозначениях в виде постоянной Планка, которая в то время еще не была известна, закон излучения Вина может быть записан в виде

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}. \quad (14)$$

Формула Рэлея-Джинса и закон Вина (имеется в виду закон излучения) – частные законы. Первая из них дает правильное спектральное распределение при малых частотах ($h\nu \ll kT$), а второй - при больших частотах ($h\nu \gg kT$). Они не дают общей картины распределения энергии по всему диапазону частот.

Согласно квантовой гипотезе Планка энергия осциллятора может принимать лишь дискретные значения, кратные целому числу элементарных порций энергии $h\nu$:

$$E = n h \nu \quad (n=0, 1, 2, \dots). \quad (15)$$

В данном случае средняя энергия осциллятора E не может быть принята равной kT , как в формуле Рэлея-Джинса. Вероятность, что осциллятор находится в состоянии с энергией E_n , пропорциональна $\exp(-\frac{E_n}{kT})$, но при вычислении средних значений (при дискретных значениях энергии) интегралы заменяются суммами. Тогда средняя энергия осциллятора

$$\dot{A}E_{\tilde{\nu}} = \frac{hn}{e^{\frac{hn}{kT}} - 1}, \quad (16)$$

а спектральная плотность энергетической светимости черного тела

$$r_{n,T} = \frac{2\pi n^2}{c^2} \frac{hn}{e^{\frac{hn}{kT}} - 1} = \frac{2\pi hn^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hn}{kT}} - 1}. \quad (17)$$

Формула Планка для спектральной плотности энергетической светимости черного тела:

$$r_{n,T} = \frac{2\pi hn^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hn}{kT}} - 1}, \quad (18)$$

$$r_{l,T} = \frac{2\pi hc^2}{l^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kTl}} - 1}, \quad (19)$$

где h - постоянная Планка, k - постоянная Больцмана, c - скорость распространения света в вакууме.

Из формулы Планка можно вывести частные законы, описывающие тепловое излучение.

Экспериментальная часть

Идея эксперимента

В данной работе предлагается исследовать зависимость мощности излучения нити лампы накаливания от температуры и проверить, подчиняется ли излучение нагретой металлической нити закону Стефана-Больцмана.

Т.к. почти вся электрическая энергия, подводимая к нити лампы, преобразуется в энергию электромагнитного излучения, то мощность W излучения можно принять равной потребляемой электрической мощности P :

$$W = P = UI \quad (20)$$

Следовательно, для определения мощности излучения нити лампы необходимо измерить напряжение U на лампе и потребляемую силу тока I .

При изменении напряжения на лампе изменяется и сила тока. Увеличение силы тока приводит к повышению температуры нити лампы и, следовательно, к увеличению мощности излучения. Температуру нити лампы, соответствующую каждому значению силы тока, можно определить, воспользовавшись известной зависимостью сопротивления R_t проводника от температуры t :

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (21)$$

где R_0 - сопротивление нити лампы при температуре 0°C ; R_t - сопротивление нити лампы при температуре $t^\circ\text{C}$; α - температурный коэффициент электрического сопротивления проводника.

Нить лампы сделана из вольфрама. Температурный коэффициент электрического сопротивления вольфрама в интервале значений температуры от 0 до 30°C равен $5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. При температуре же видимого свечения нити температурный коэффициент электрического сопротивления вольфрама равен приблизительно $5,8 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Из формулы зависимости электрического сопротивления от температуры можно выразить температуру нити:

$$t = \frac{1}{\alpha} \frac{R_t}{R_0} - 1 \quad (22)$$

Легко найти и абсолютную температуру T :

$$T = t + 273 = \frac{1}{\alpha} \frac{R_t}{R_0} - 1 + 273 = \frac{1}{5,8 \times 10^{-3}} \frac{R_t}{R_0} - 1 + 273. \quad (23)$$

Величину R_t определяют из закона Ома:

$$R_t = \frac{U}{I}, \quad (24)$$

А величину R_0 можно вычислить, зная значение R_{t_1} при комнатной температуре t_1 :

$$R_0 = \frac{R_{t_1}}{1 + \alpha t_1} = \frac{R_{t_1}}{1 + 5 \times 10^{-3} t_1}. \quad (25)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерьте электрическое сопротивление R нити накала лампы при комнатной температуре t с помощью измерительного моста или цифрового мультиметра. Вычислите электрическое сопротивление R нити лампы при температуре 0°C .

2. Подключите лампу к источнику тока. Включите последовательно с ней амперметр и параллельно вольтметр (рис. 4). Изменяя напряжение U на лампе от 16 до 36 В, измерьте через каждые 4 В значения силы тока I .

3. Вычислите мощность W излучения лампы по формуле (20).

4. Вычислите электрическое сопротивление R_t нити лампы при различных значениях силы тока по формуле (24).

5. Вычислите значения абсолютной температуры T нити накала (формула (23)) и четвертую степень температуры T^4 .

6. Вычислите отношение W/T^4 для каждой пары значений T и W . Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу 1.

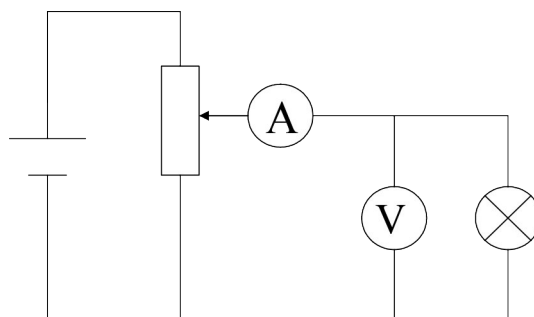


Рис. 4.

Таблица 1.

R_{t_1} , Ом	t_1 , $^\circ\text{C}$	R_0 , Ом	U , В	I , А	R_t , Ом	T , К	T^4 , K^4	W , Вт
			16					
			20					
			24					
			28					
			32					
			36					

7. Постройте график зависимости $W=f(T^4)$. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. В чем основное отличие теплового излучения от других видов излучения?
2. Каков физический смысл универсальной функции Кирхгофа?
3. Можно ли на опыте реализовать абсолютно черное тело?
4. Как и во сколько раз изменится энергетическая светимость черного тела, если его термодинамическая температура увеличится вдвое?
5. Как объяснить переход белого каления в красное при остывании металла?

Лабораторная работа 16 ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Цель работы: расширить представления о внешнем фотоэффекте, экспериментально определить постоянную Планка.

Оборудование и материалы: лабораторная установка «Изучение фотоэффекта и определение постоянной Планка», светофильтры.

Теоретическая часть

Явление вырывания электронов из вещества под действием электромагнитного излучения получило название фотоэлектрического эффекта или **фотоэффекта**.

Различают внешний и внутренний фотоэффект.

При **внешнем фотоэффекте** электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду.

При **внутреннем фотоэффекте** оптически возбуждаемые электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая электрическую нейтральность последнего. При этом изменяется электропроводность (фотопроводимость), возникает электродвижущая сила, изменяется диэлектрическая проницаемость (фотодиэлектрический эффект).

Явление фотоэффекта было открыто в 1887 году Генрихом Герцем. Он обнаружил, что проскакивание искры между шариками разрядника значительно облегчается, если отрицательно заряженный шарик осветить ультрафиолетовыми лучами. При освещении такими же лучами положительно заряженного тела потери заряда не наблюдается. Более того, если тело не было заряжено, то при освещении оно заряжается положительно до потенциала в несколько вольт. Однако, занятый исследованием электромагнитных волн, Герц не обратил внимание на это явление серьезного внимания.

Первые систематические исследования явления фотоэффекта принадлежат Столетову, проведенные в 1888-1890 гг. Схема установки, с помощью которой Столетов проводил исследования представлена на рисунке 1.

Конденсатор, образованный проволочной сеткой и сплошной пластиной, был включен последовательно с гальванометром G в цепь батареи. Свет, проходя через сетку, падал на сплошную пластинку. В результате в цепи возникал ток, регистрировавшийся гальванометром. В результате экспериментальных исследований Столетов установил следующие **закономерности фотоэффекта**:

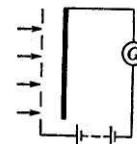


Рис. 1

- 1) наибольшее действие оказывают ультрафиолетовые лучи;
- 2) сила тока возрастает с увеличением освещенности пластины;
- 3) испускаемые под действием света заряды имеют отрицательный знак.

В 1898 году Ленард и Томсон, измерив удельный заряд, испускаемых под действием света частиц, установили, что эти частицы являются электронами. В 1905 г. теоретически фотоэффект объяснил А. Эйнштейн.

Впоследствии установка для исследования фотоэффекта, предложенная Столетовым, была усовершенствована и ее принципиальная схема представлена на рис.2.

Вольтамперная характеристика фотоэлемента

Построим вольтамперную характеристику фотоэлемента. Фотоэлемент представляет собой небольшой баллон, в котором создан вакуум и в центре которого находится положительный электрод (анод) (рис. 2). На часть внутренней поверхности баллона нанесен тонкий слой металла, представляющий отрицательный электрод (катод).

Допустим, что фотоэлемент включен в цепь, изображенную на рис. 2. Передвигая движок потенциометра и снимая показания приборов, можно построить вольтамперную характеристику фотоэлемента. При $U = 0$ через элемент проходит небольшой ток (рис. 3). Под действием света из катода вырываются электроны, и он заряжается положительно. Вырванные электроны вблизи катода создают отрицательно заряженное облако, из которого большая часть электронов попадает обратно на катод (катод при $U = 0$ притягивает электроны), а часть электронов из облака попадает на анод. Они и создают небольшой ток. Для прекращения фототока необходимо приложить обратное по знаку напряжение U_z , которое называют задерживающим напряжением.

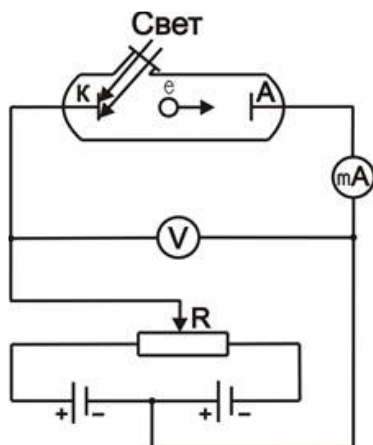


Рис. 2

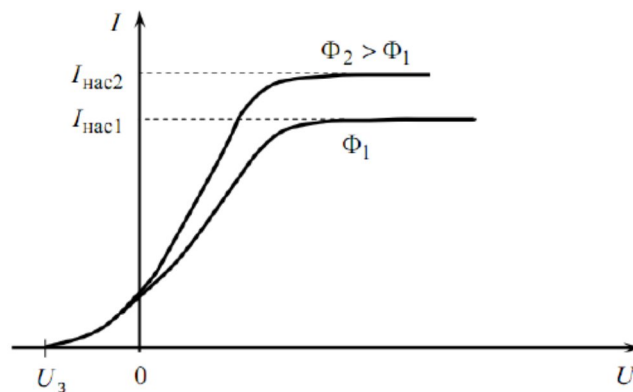


Рис. 3

Если увеличивать напряжение, то по мере роста все большее число электронов за секунду попадает на анод. Облако из электронов вблизи катода редет, а ток через фотоэлемент растет. При достаточно сильном поле облако из электронов вблизи катода полностью исчезнет. Все электроны, вышедшие из катода, будут попадать на анод – наступит насыщение: дальнейшее усиление поля в баллоне фотоэлемента не приведет к увеличению тока. Ток насыщения $I_{\text{нас}}$ определяется тем количеством электронов, которые вырываются в секунду из металла.

Фототок насыщения зависит от падающего на фотоэлемент светового потока Φ . Он будет тем больше, чем больше число фотонов в секунду падает на катод. Очевидно, что зависимость $I_{\text{нас}}(\Phi)$ должна быть линейной. По этой причине вакуумные фотоэлементы могут служить точными фотометрами, позволяющими измерять световые потоки. Следует отметить, что при достаточно больших световых потоках ток насыщения перестает увеличиваться пропорционально световому потоку – наступает насыщение фотоэлемента по световому потоку.

Если световой поток, падающий на фотоэлемент, создается точечным источником, то его величина обратно пропорциональна квадрату расстояния R от источника до фотоэлемента:

$$\Phi \sim \frac{1}{R^2}$$

При изучении вольт-амперных характеристик разнообразных материалов при различных частотах падающего на катод излучения и различных энергетических освещенностях катода и обобщения полученных данных были установлены следующие три закона внешнего фотоэффекта.

Законы внешнего фотоэффекта.

I. Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода).

II. Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν , а именно линейно возрастает с увеличением частоты.

III. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд не должно было бы представлять трудностей. Действительно, под действием поля световой волны в металле возникают вынужденные колебания электронов, амплитуда которых (например, при резонансе) может быть достаточной для того, чтобы электроны покинули металл; тогда и наблюдается фотоэффект. Кинетическая энергия, с которой электрон вырывается из металла, должна была бы зависеть от интенсивности падающего света, так как с увеличением последней электрону передавалась бы большая энергия. Однако этот вывод противоречит II закону фотоэффекта. Так как, по волновой теории, энергия, передаваемая электронам, пропорциональна интенсивности света, то свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности должен был бы вырывать электроны из металла; иными словами, «красной границы» фотоэффекта не должно

быть, что противоречит III закону фотоэффекта

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им **квантовой теории фотоэффекта**. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν не только испускается и поглощается, но и распространяется в пространстве отдельными порциями или квантами, энергия которых $\varepsilon = h\nu$, h – постоянная Планка ($h=6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью c распространения света в вакууме. Эти кванты электромагнитного излучения получили название **фотонов**.

В соответствии с гипотезой предложенной Эйнштейном, энергия, полученная электроном, доставляется ему в виде кванта $h\nu$, который усваивается им целиком. Часть этой энергии, равная работе выхода $A_{\text{вых}}$, затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Остаток энергии переходит в кинетическую энергию вылетевшего из металла фотоэлектрона.

Фотоны, падая на поверхность металла, проникают на очень малую глубину в металл и поглощаются отдельными его электронами проводимости. При этом их энергия практически моментально возрастает до значения, достаточного, чтобы преодолеть потенциальный барьер вблизи поверхности металла, и они вылетают наружу.

Закон сохранения энергии позволяет написать простое соотношение, связывающее скорость фотоэлектронов с частотой поглощаемого света.

Энергия фотона после поглощения его, с одной стороны, расходуется на преодоление потенциального барьера (эта часть энергии называется работой выхода электрона из металла), а с другой стороны, частично сохраняется у электрона вне металла в виде кинетической энергии. Таким образом, баланс энергий выглядит следующим образом:

$$h\nu = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} + A_{\text{вых}} \quad (1)$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона, m и v_{max} – его масса и скорость соответственно, ν – частота излучения.

Соотношение (1) называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Оно в частности показывает, что энергия фотоэлектронов, действительно, никак не зависит от интенсивности света, а линейно зависит от частоты света. При достаточно низкой частоте света фотоэффект не наблюдается: энергии фотона не хватает на преодоление потенциального барьера. Критическая частота, при которой прекращается фотоэффект, называется красной границей фотоэффекта. У различных металлов красная граница фотоэффекта различна. Она зависит лишь от работы выхода электрона, т. е. от химической природы вещества и состояния его поверхности:

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{вых}} \quad (2)$$

Значение работы выхода для некоторых металлов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{вых}},$ эВ	2.2	2.3	6.3	2.1	4.7	2.0	4.0

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта).

Уравнение Эйнштейна позволяет объяснить II и III законы фотоэффекта. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (числа фотонов), так как ни $A_{\text{вых}}$, ни h от интенсивности света не зависят (II закон фотоэффекта). Так как с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A_{\text{вых}} =$), то при некоторой, достаточно малой частоте $\nu = \nu_{\text{кр}}$, кинетическая энергия фотоэлектронов станет

равной нулю и фотоэффект прекратится (III закон фотоэффекта).

Фотонная теория излучения. Развивая гипотезу М.Планка о квантах, А.Эйнштейн в 1905 г. предположил, что квантовые свойства излучения (света) проявляются не только при испускании и поглощении его веществом, но и при распространении излучения в пространстве. Возрождая корпускулярную теорию света, предложенную Ньютоном еще в начале 18 столетия, Эйнштейн выдвинул гипотезу, согласно которой излучение можно представить состоящим из большого числа частиц, каждая из которых, обладая квантом энергии, движется в пространстве со скоростью света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Рассмотрим свойства таких частиц.

Частица излучения, которую называли фотоном, представляет собой ультрарелятивистскую незаряженную частицу. Свойства фотона могут быть описаны только с использованием основных соотношений специальной теории относительности. В частности, из этой теории следует, что фотон является уникальной элементарной частицей, имеющей нулевую массу покоя. Это означает, что фотон всегда движется со скоростью c и не может находиться в состоянии покоя. Если при неупругом столкновении с другой элементарной частицей фотон «останавливается», то он исчезает, передавая всю свою энергию этой частице.

Энергия фотона

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega, \quad (3)$$

где λ – длина волны, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка с чертой ($\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с), $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота.

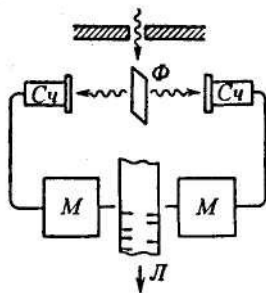
Как и любая материальная частица, фотон имеет массу m_{ϕ} , которая связана с его энергией релятивистской формулой: $m_{\phi}c^2 = \varepsilon_{\phi}$. С учетом (3) находим:

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2}$$

Движущийся со скоростью c фотон обладает импульсом, величина которого связана с его энергией релятивистским соотношением $p_{\phi}c = \varepsilon_{\phi}$, учитывающим, что масса покоя фотона равна нулю. Отсюда

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Непосредственное подтверждение гипотезы Эйнштейна дал опыт Боте.



бы одна против другой. В действительности же наблюдалось совершенно беспорядочное расположение отметок. Это можно объяснить лишь тем, что в отдельных актах испускания возникают световые частицы, летящие то в одном, то в другом направлении.

Таким образом, экспериментально было доказано существование особых световых частиц – фотонов.

Определение постоянной Планка

С помощью уравнения Эйнштейна (1) для фотоэффекта, можно экспериментально получить значение постоянной Планка. Для этого необходимо измерить величину запирающего напряжения при различных частотах падающего на фотоэлемент света. В этом случае работа внешнего поля над электронами равна кинетической энергии электрона при вылете из катода:

$$eU_3 = \frac{mv_{max}^2}{2}, \quad (4)$$

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

С учётом формулы (4) уравнение (1) можно переписать в виде:

$$h\nu = A_{вых} + eU_3, \quad (5)$$

или окончательно:

$$U_3 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A_{вых}}{e}. \quad (6)$$

Из последнего уравнения видно, что если строить по точкам график экспериментальной зависимости $U_3(\nu)$, то должна получиться прямая. Тангенс угла наклона этой прямой численно равен $\frac{h}{e}$.

Описание установки и проведение эксперимента.

Лабораторная установка (рис. 4) состоит из металлического корпуса 1, на котором установлен объектив 2 фотоэлемента и осветитель 3. Лампа осветителя установлена на подвижной каретке, которая может перемещаться вдоль установки. За счёт этого можно изменять расстояние от источника света до линзы фотоприёмника. Это расстояние измеряется по линейке 4. Для фиксации осветителя в определённой позиции служит зажимный винт 6. Имеется комплект из 5 светофильтров, которые устанавливаются на фотоприёмник. Перед фотоприёмником установлена стойка 5 для крепления вращающихся поляроидов, которые служат для ослабления светового потока, падающего на фотоэлемент.

Внутри металлического корпуса 1 расположен вакуумный фотоэлемент, блоки питания установки, а также встроенный датчик тока и напряжения, который служит для измерения фототока и катод-анодного напряжения фотоэлемента.

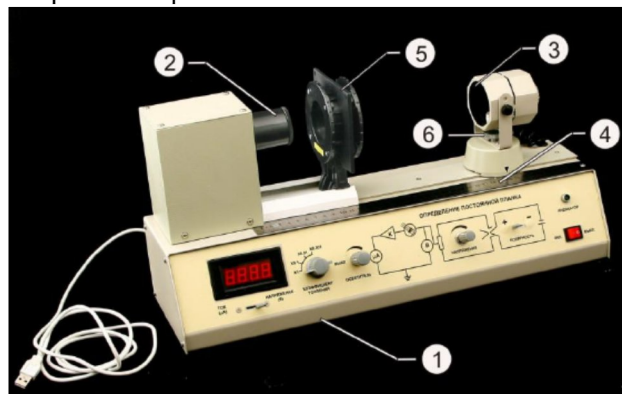


Рис. 4

1. Включите питание установки, дайте ей прогреться в течение 5 минут, передвиньте источник света на отметку 25 см.
2. Установите максимальную интенсивность света (не меняйте в течение эксперимента). Полярность напряжения переключите на «-». Режим отображения цифрового дисплея переключите в положение «Ток». Переключатель «Коэффициент усиления» установите в положение «x0.001».
3. Установите красный светофильтр, значение длины волны (указана на оправе) занесите в таблицу. Изменяя напряжение, добейтесь падения фототока до нуля. ВНИМАНИЕ! Запирающее напряжение – минимальное значение напряжения, при котором фотоэффект еще возможен. Если добились нулевого значения тока, то дальнейшее увеличение напряжения приведет к искажению результатов!
4. Зафиксируйте значение запирающего напряжения U_3 , данные занесите в отчет.
5. Повторите измерения для остальных светофильтров.
6. Рассчитайте частоту падающего света $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

7. Постройте зависимость $U_3(\nu)$.
8. По углу наклона прямой, описываемой уравнением (6), определите значение постоянной Планка.

Контрольные вопросы.

1. Что такое фотоны?
2. Напишите формулу энергии фотона.
3. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
4. Сформулируйте законы фотоэффекта.
5. Что такое работа выхода? Чья это характеристика?
6. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
7. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
8. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода.
9. Проанализируйте вольт-амперную характеристику фотоэлемента.

Лабораторная работа 17

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Квантовая физика», «Комптоновское рассеяние». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы:

- * Знакомство с моделями электромагнитного излучения и их использованием при анализе процесса рассеяния рентгеновского излучения на веществе.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей эффекта Комптона.
Экспериментальное определение комптоновской длины волны электрона.

Краткая теория.

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комптон (1892–1962), исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также излучение более длинных волн. Опыты показали, что разность $\Delta l = l' - l$ не зависит от длины волны l падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только величиной угла рассеяния q :

$$\Delta l = l' - l = 2l_C \sin^2(q/2), \quad (1)$$

где l' – длина волны рассеянного излучения, l_C – **комптоновская длина волны** (при рассеянии фотона на электроне $l_C = 2,426$ пм).

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Этот эффект не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны при рассеянии изменяться не должна: под действием периодического поля световой волны электрон колеблется с частотой поля и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.

Объяснение эффекта Комптона дано на основе квантовых представлений о природе света. Если считать, как это делает квантовая теория, что излучение имеет корпускулярную природу, т. е. представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона – результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества (для легких атомов электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными). В процессе этого столкновения фотон передает электрону часть своей энергии и импульса в соответствии с законами их сохранения.

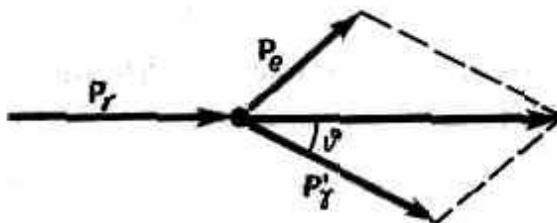


Рис. 1

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц (рис.1) – налетающего фотона, обладающего импульсом $p_\gamma = h\nu/c$ и энергией $e_\gamma = h\nu$, с покоящимся свободным электроном (энергия покоя $W_0 = m_0c^2$; m_0 – масса покоя электрона). Фотон, столкнувшись с электроном, передает ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается). Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. Пусть импульс и энергия рассеянного фотона равны $p'_\gamma = h\nu'/c$ и $e'_\gamma = h\nu'$. Электрон, ранее покоившийся, приобретает импульс $p_e = m\nu$, энергию $W = mc^2$ и приходит в движение – испытывает отдачу. При каждом таком столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

Согласно закону сохранения энергии,

$$W_0 + e_g = W + e'_g, \quad (2) \text{ а согласно закону сохранения импульса, } \mathbf{p}_g = \mathbf{p}_e + \mathbf{p}'_g. \quad (3)$$

Подставив в выражении (2) значения величин и представив (3) в соответствии с рис.1, получим

$$m_0 c^2 + hn = mc^2 + hn', \quad (4)$$

$$(mv)^2 = \frac{h^2 n^2}{c^2} + \frac{h^2 n'^2}{c^2} - 2 \frac{h^2}{c^2} n n' \cos q \quad (5)$$

$$\text{Масса электрона отдачи связана с его скоростью } v \text{ соотношением } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (6)$$

Возведя уравнение (4) в квадрат, а затем вычитая из него (5) получим с учетом (6):

$$m_0 c^2 (n - n') = h n n' (1 - \cos q).$$

Поскольку $n = c/\lambda$, $n' = c/\lambda'$ и $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$, получим:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos q) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{q}{2} \quad (7)$$

Выражение (7) есть не что иное, как полученная экспериментально Комптоном формула (1). Подстановка в нее значений h , m_0 и c дает комптоновскую длину волны электрона $\lambda_c = h/(m_0 c) = 2,426 \text{ пм}$.

Наличие в составе рассеянного излучения «несмещенной» линии (излучения первоначальной длины волны) можно объяснить следующим образом. При рассмотрении механизма рассеяния предполагалось, что фотон соударяется лишь со свободным электроном. Однако если электрон сильно связан с атомом, как это имеет место для внутренних электронов (особенно в тяжелых атомах), то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Так как масса атома по сравнению с массой электрона очень велика, то атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона. Поэтому в данном случае длина волны λ' рассеянного излучения практически не будет отличаться от длины волны λ падающего излучения.

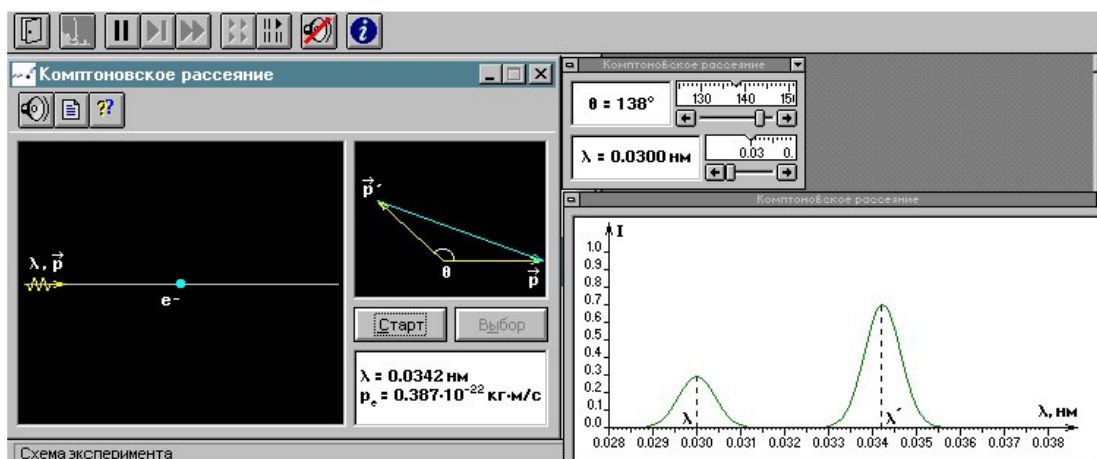
Из приведенных рассуждений следует также, что эффект Комптона не может наблюдаться в видимой области спектра, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом, при этом даже внешний электрон нельзя считать свободным.

Эффект Комптона наблюдается не только на электронах, но и на других заряженных частицах, например протонах, однако из-за большой массы протона его отдача «просматривается» лишь при рассеянии фотонов очень высоких энергий.

Как эффект Комптона, так и фотоэффект на основе квантовых представлений обусловлены взаимодействием фотонов с электронами. В первом случае фотон рассеивается, во втором – поглощается. Рассеяние происходит при взаимодействии фотона со свободным электроном, а фотоэффект – со связанными электронами. Можно показать, что при столкновении фотона со свободным электроном не может произойти поглощения фотона, так как это находится в противоречии с законами сохранения импульса и энергии. Поэтому при взаимодействии фотонов со свободными электронами может наблюдаться только их рассеяние, т.е. эффект Комптона.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок.



Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.
Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.
2. Подведите маркер мыши к движку регулятора длины волны падающего ЭМИ и установите первое значение длины волны из таблицы 2, соответствующее номеру вашей бригады.
3. Подведите маркер мыши к движку регулятора угла приема рассеянного ЭМИ и установите первое значение 60° из таблицы 1.
4. По картине измеренных значений определите длину волны λ' рассеянного ЭМИ и запишите в первую строку таблицы 1.
5. Изменяйте угол наблюдения с шагом 10°, а записывайте измеренные значения λ' в соответствующие строки таблицы 1.
6. Заполнив все строки таблицы 1, измените значение длины волны падающего ЭМИ в соответствии со следующим значением для вашей бригады из таблицы 2. Повторите измерения длины волны рассеянного ЭМИ, заполняя сначала таблицу 3, а затем и таблицу 4 (аналогичные таблице 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений

Длина волны $\lambda =$ пм			
Номер измер.	J град	λ' , пм	$1 - \cos J$
1	60		
2	70		
.....			
11	160		

ТАБЛИЦА 2 для выбора значений
(не перерисовывать)

Номер бригады	Длина волны падающего ЭМИ (пм)		
1,5	30	50	70
2,6	35	55	80
3,7	40	60	90
4,8	45	65	100

Таблицы 3 и 4 аналогичны таблице 1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

1. Вычислите и запишите в таблицы 1, 3 и 4 величины $1 - \cos J$.
2. Постройте график зависимости изменения длины волны ($\Delta \lambda = \lambda' - \lambda$) от разности $(1 - \cos J)$ для каждой серии измерений.
3. Определите по наклону графика значение комптоновской длины волны электрона

$$\lambda_c = \frac{D(\Delta \lambda)}{D(1 - \cos J)}.$$

4. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите модели, с помощью которых описывается электромагнитное излучение.
2. Назовите области физики в которых используются соответствующие модели ЭМИ.
3. Что такое луч?
4. Что такое гармоническая волна?
5. Сформулируйте связь между характеристиками ЭМИ в волновой и квантовой моделях.
6. Назовите эффекты, для описания которых надо использовать и волновую и квантовую модели ЭМИ. Проиллюстрируйте один из эффектов.
7. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона с электроном в эффекте Комптона.
8. Сравните поведение фотонов после взаимодействия с электронами в эффекте Комптона и фотоэффекте.
9. Что такое комптоновская длина волны частицы?
10. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии фотонов на электронах, сильно связанных с ядром атома?
11. Как меняется энергия фотона при его комптоновском рассеянии?
12. Что происходит с электроном после рассеяния на нем фотона?
13. Чем отличается масса от массы покоя? Когда они совпадают?
14. Напишите уравнение для импульса фотона.
15. Напишите формулу для эффекта Комптона.
16. Напишите формулу для комптоновской длины волны электрона.
17. Чему равно максимальное изменение длины волны рассеянного фотона и когда оно наблюдается?

Лабораторная работа 18

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ВОДОРОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА.

Цель работы: изучение видимой части спектра излучения атомарного водорода, экспериментальное определение постоянной Ридберга и ее сравнение с вычисленной теоретически.

Оборудование и материалы: водородная газоразрядная трубка, источник питания трубки, спектроскоп.

Теоретическое введение.

Важную роль в раскрытии законов микромира сыграло экспериментальное изучение спектров атома водорода. Бальмер, а затем Ридберг и Ритц установили, что спектр излучения отдельных атомов водорода (разреженных газов) состоит из узких линий; в нем световая энергия концентрируется в узких областях частот.

Опытами Резерфорда по рассеянию α – частиц было установлено, что атом любого химического элемента представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено тяжелое положительное ядро с зарядом Ze (Z – атомный номер элемента), имеющее размеры 10^{-12} см, а вокруг ядра расположены Z электронов, расположенных по всему объему, занимаемому атомом.

Ядерная модель атома в сочетании с классической механикой и электродинамикой не в состоянии объяснить ни устойчивость атома, ни характер атомного спектра. Выход был предложен Нильсом Бором, который сформулировал законы движения электрона в атоме в виде постулатов.

1. Электрон в атоме может вращаться только по строго определенным (стационарным) орбитам, радиус которого определяется из условия

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi} \quad (1)$$

где $m_e v r$ – момент импульса электрона, h – постоянная Планка, m_e и v соответственно масса и скорость электрона, $n=1,2,3,\dots$ – квантовые числа, определяющие принадлежности электрона к той или иной орбите радиуса r .

2. Вращаясь по стационарным орбитам, электрон не излучает энергии.

3. Излучение происходит лишь при переходе электрона из стационарного состояния с большим значением энергии E_2 в другое стационарное состояние с меньшим значением энергии E_1 . При этом излучается квант света, частота (ν) которого определяется из условия:

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (2)$$

где $h\nu$ – энергия излучения кванта.

Излучение происходит при переходе электрона с внешних орбит на внутренние. Если возбужденный электрон переходит с внутренних орбит на внешние, то происходит поглощение энергии.

Вычислим радиус стационарных орбит и полную энергию электрона в водородоподобном атоме (атом с порядковым номером Z , из которого удалены все электроны, кроме одного). Уравнение движение электрона имеет вид:

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} \quad (3)$$

Исключив v из уравнений (1) и (3), получим выражение для радиусов допустимых (разрешенных) орбит:

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m Z e^2} \quad (4)$$

Внутренняя энергия атома складывается из кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

Из выражения (3) следует, что:

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}, \text{ следовательно } E = -\frac{1}{2} \cdot \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \text{ подставив из выражения}$$

(4) значение радиуса получим, разрешенные значения энергий:

$$-E = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{Zm_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (5)$$

Для атома водорода $Z=1$. Из формулы (5) следует, что квантовое число n определяет энергию электрона в атоме, так как остальные величины остаются постоянными.

Состояния с различными значениями энергии называются уровнями. Для перевода атома в возбужденное состояние (с $n>1$) ему необходимо сообщить энергию. Возврат атома в состояние с меньшим значением энергии сопровождается излучением кванта энергии

$$h\nu = E_n - E_m = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (6)$$

Разделив обе части уравнения (6) на hc , получим:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 c} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (7)$$

Длины волн спектра водорода могут быть описаны очень точно следующей формулой:

$$\tilde{\nu} = \left(\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \right) \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (8)$$

Постоянная R называется постоянной Ридберга, $\tilde{\nu}$ – спектроскопическое волновое число, m – число, определяющее серию (для наблюдаемой в работе серии Бальмера $m=2$), $n=m+1; m+2, \dots$ – числа, определяющие отдельные линии в каждой серии.

Из дискретности частот излучения (на основе гипотезы Планка о пропорциональности энергии излучения частоте света) естественно следует вывод о дискретности энергетических состояний атома. Спектральные закономерности и другие свойства атома водорода нашли полное объяснение в квантовой механике. Полученные с помощью уравнения Шредингера значения энергии, т.е. уровни энергии атома водорода, равны

$$-E = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (9)$$

где $n=1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число. Заметим, что выражение (9) совпадает с формулой (5), полученной Бором для энергии атома водорода. Однако, если Бору пришлось вводить дополнительные гипотезы (постулаты), то в квантовой механике дискретные значения энергии, являясь следствием самой теории, вытекают непосредственно из решения уравнения Шредингера.

Сравнивая (9) с (8), получим для R следующее выражение:

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 c} \quad (10)$$

Серию линий, отвечающую $m=1$ и $n=2,3,4,\dots$, называют серией Лаймана. Все линии этой серии расположены в ультрафиолетовой области спектра.

Большинство линий серии Бальмера ($m=2$) расположено в видимой области спектра. Линии остальных серий ($m=3,4,\dots$) лежат в инфракрасной области. На рис.1 изображены уровни энергии атома водорода и показаны (вертикальными линиями) возможные электронные переходы между состояниями.

На рис.1б показана схема формирования серии Бальмера с учетом закона сохранения момента импульса. По вертикали отложены значения энергии, а по горизонтали указаны состояния с различными значениями момента импульса, определяемого квантовым числом l .



Газоразрядную водородную трубку, являющуюся источником излучения, устанавливают перед входной щелью спектроскопа. Для наблюдения спектра служит средняя суженная часть трубки, так как интенсивность свечения в этой части наибольшая. Необходимое для разряда напряжение подается на трубку от источника высокого напряжения. Регистрацию спектров излучения производят визуально с помощью зрительной трубы.



Рис. 2

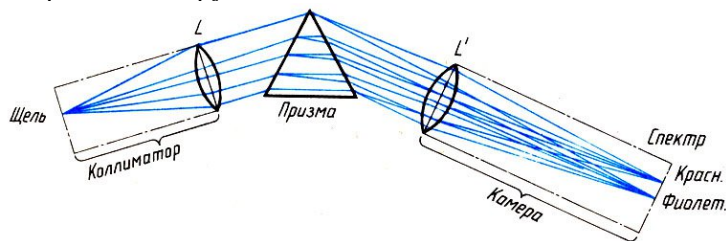


Рис. 3

Проведение эксперимента.

1. Измерьте длины волн водородных линий. Найдите в спектре крайнюю левую линию (в красной области спектра). Для отсчета положения спектральной линии ее центр совмещают с острием указателя. Отсчет производится по делениям барабана. Для уменьшения ошибки ширину щели делают по возможности малой (0,02-0,03 мм). Для наблюдения слабых линий в фиолетовой области щель следует несколько увеличить (до 0,05-0,06 мм). Результаты измерений занесите в таблицу. Измерение линий спектра повторите не менее трех раз. Следует отметить, что в спектре разряда наряду с линиями атомарного спектра наблюдается спектр молекулярного водорода. Молекулярный спектр состоит из сравнительно слабых полос (уширенных линий) в красно-желтой, зеленой и в голубой областях спектра.
2. Зная волновые числа линии и квантовые числа соответствующих электронных переходов, построить график зависимости $\tilde{\nu} \in f(n^{-2})$. Из уравнения (8) видно, что график представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой равен R , а на оси ординат прямая отсекает отрезок, равный $R/4$ (рис.4).
3. Подсчитайте R по формуле (10) и сравните с результатом, полученным опытным путем. Определите погрешности измерений.

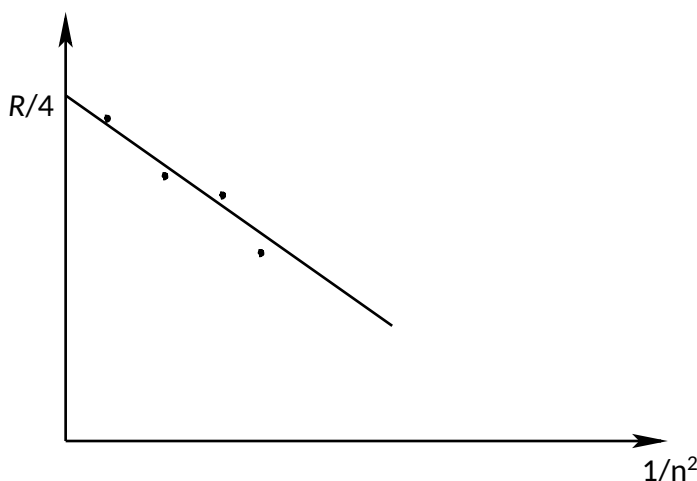


Рис.4

Контрольные вопросы.

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?

2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ? Что является источником этого спектра?
3. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
4. При каких условиях излучается сплошной спектр ЭМИ?
5. Опишите планетарную модель атома.
6. Сформулируйте основные положения теории Бора.
7. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики фотона и электрона, который излучает данный фотон?
9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине**

ФИЗИКА

Направление подготовки/ специальность	19.03 .03 Продукты питания животного происхождения
Направленность (профиль)/специализация	Биоинженерия и технологии
Год начала обучения	2026
Форма обучения	очная
Реализуется в 3 семестре	

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Общая характеристика самостоятельной работы студента	3
Цель и задачи самостоятельной работы	5
Методические указания по видам работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины:	6
Подготовка к лекциям	6
Подготовка к защите лабораторных работ	8
Методические указания по подготовке к экзамену	9

Введение

Основная задача высшего образования заключается в формировании творческой личности, способной к саморазвитию, самообразованию, инновационной деятельности.

Самостоятельная работа студентов является одной из важнейших составляющих образовательного процесса. Независимо от полученной профессии и характера работы любой начинающий специалист должен обладать фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности своего профиля, опытом творческой и исследовательской деятельности по решению новых задач, опытом социально-оценочной деятельности. Все эти составляющие образования формируются именно в процессе самостоятельной работы студентов, так как она предполагает максимальную индивидуализацию деятельности каждого студента и может рассматриваться как средство совершенствования творческой личности. Основным принципом организации самостоятельной работы студентов является комплексный подход, направленный на формирование навыков репродуктивной и творческой деятельности студента в аудитории, при внеаудиторных контактах с преподавателем на консультациях и домашней подготовке. Среди основных видов самостоятельной работы студентов традиционно выделяют: подготовка к лекциям, семинарским и практическим занятиям, подготовка к зачетам и экзаменам, написание рефератов, выполнение лабораторных и контрольных работ.

Общая характеристика самостоятельной работы студента

Любой вид занятий, создающий условия для зарождения самостоятельной мысли, познавательной и творческой активности студента связан с самостоятельной работой.

В широком смысле под самостоятельной работой понимают совокупность всей самостоятельной деятельности студентов как в учебной аудитории, так и вне ее, в контакте с преподавателем и в его отсутствие.

Самостоятельная работа может реализовываться: непосредственно в процессе аудиторных занятий – на лекциях, практических и семинарских занятиях, при выполнении контрольных и лабораторных работ и др.; в контакте с преподавателем вне рамок аудиторных занятий – на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.; в библиотеке, дома, в общежитии, на кафедре и других местах при выполнении студентом учебных и творческих заданий.

В Федеральных государственных образовательных стандартах высшего профессионального образования (ФГОС ВО) на внеаудиторную работу отводится не менее половины бюджета времени студента за весь период обучения. Это время полностью может быть использовано на самостоятельную работу. Кроме того, большая часть времени, отводимого на аудиторные занятия, так же включает самостоятельную работу. Таким образом, времени на самостоятельную работу в учебном процессе вполне достаточно, вопрос в том, как эффективно использовать это время.

Цель самостоятельной работы студента – осмысленно и самостоятельно работать сначала с учебным материалом, затем с научной информацией, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свою профессиональную квалификацию.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная – самостоятельная работа выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию;
- внеаудиторная – самостоятельная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия

Содержание аудиторной и внеаудиторной самостоятельной работы студентов определяется в соответствии с рекомендуемыми видами учебных заданий, представленными в рабочей программе учебной дисциплины.

Самостоятельная работа помогает студентам:

1) овладеть знаниями:

- чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы и т.д.);
- составление плана текста, графическое изображение структуры текста, конспектирование текста, выписки из текста и т.д.;

- работа со справочниками и др. справочной литературой;
- ознакомление с нормативными и правовыми документами;
- учебно-методическая и научно-исследовательская работа;
- использование компьютерной техники и Интернета и др.;

2) закреплять и систематизировать знания:

- работа с конспектом лекции;
- обработка текста, повторная работа над учебным материалом учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио и видеозаписей;

- подготовка плана;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- подготовка ответов на контрольные вопросы;
- заполнение рабочей тетради;
- аналитическая обработка текста;
- подготовка мультимедиа презентации и докладов к выступлению на семинаре (конференции, круглом столе и т.п.);

- подготовка реферата;
- составление библиографии использованных литературных источников;
- разработка тематических кроссвордов и ребусов;
- тестирование и др.;

3) формировать умения:

- решение ситуационных задач и упражнений по образцу;
- выполнение расчетов (графические и расчетные работы);
- решение профессиональных кейсов и вариативных задач;
- подготовка к контрольным работам;
- подготовка к тестированию;
- подготовка к деловым играм;
- проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности;
- опытно - экспериментальная работа;
- анализ профессиональных умений с использованием аудио- и видеотехники и др.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности и уровня умений студентов.

Контроль результатов самостоятельной работы студентов должен осуществляться в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия и внеаудиторную самостоятельную работу студентов по дисциплине, может проходить в письменной, устной или смешанной форме.

Формы самостоятельной работы студента могут различаться в зависимости от цели, характера, дисциплины, объема часов, определенных учебным планом: подготовка к лекциям, семинарским, практическим и лабораторным занятиям; изучение учебных пособий; изучение и конспектирование хрестоматий и сборников документов; изучение в

рамках программы курса тем и проблем, не выносимых на лекции и семинарские занятия; написание тематических докладов, рефератов на проблемные темы; выполнение исследовательских и творческих заданий; написание контрольных и лабораторных работ; составление библиографии и реферирование по заданной теме.

Самостоятельная работа по дисциплине «Физика» направлена на формирование следующих компетенций:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-2 Способен применять основные законы и методы исследований естественных наук для решения задач профессиональной деятельности	ИД-1 ОПК-2 Применяет законы и методы научного исследования для решения задач профессиональной деятельности	Готовность применять законы и методы научного исследования для решения задач профессиональной деятельности
	ИД-2 ОПК-2 Объясняет, описывает и интерпретирует решение учебных и профессиональных задач на основе имеющихся научных знаний, умеет прогнозировать характер протекания технологических процессов на основе имеющихся научных данных	Готовность объяснять, описывать и интерпретировать решение учебных и профессиональных задач на основе имеющихся научных знаний, уметь прогнозировать характер протекания технологических процессов на основе имеющихся научных данных

Цель и задачи самостоятельной работы

Ведущая цель организации и осуществления СРС совпадает с целью обучения студента – формирование набора общенаучных, профессиональных и специальных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 19.03 .03 Продукты питания животного происхождения

При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности. Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Задачами СРС являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;

- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовых и выпускной квалификационной работ, для эффективной подготовки к итоговым зачетам и экзаменам.

Методические указания по видам работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины:

Подготовка к лекциям

Лекция (от лат. lectio) – это систематическое, последовательное, монологическое устное изложение преподавателем (лектором) учебного материала, как правило, теоретического характера. Как одна из организационных форм обучения и один из методов обучения лекция традиционна для высшей школы, где на ее основе формируются курсы по многим предметам учебного плана. Лекция является ведущей формой организации учебного процесса в высшем учебном заведении. Основными организационными вопросами при этом являются, во-первых, подготовка к восприятию лекции, и, во-вторых, как записывать лекционный материал. Особое значение лекции состоит в том, что знакомит студентов с наукой, расширяет, углубляет и совершенствует ранее полученные знания, формирует научное мировоззрение, учит методике и технике лекционной работы. Кроме того, на лекции мобилизуется внимание, вырабатываются навыки слушания, восприятия, осмысления и записывания информации. Все это призвано воспитывать логическое мышление студента и закладывает основы научного исследования. Каждой лекции отводится конкретное место в системе учебных занятий по курсу, а работа с лекционным материалом является одной из форм самостоятельной внеаудиторной работы студента. В зависимости от дидактических целей выделяют на несколько типов лекций, которые различаются по строению, приемам изложения материала, характеру обобщений и выводов. Виды лекций: 1. Вводная лекция имеет ряд особенностей. Во-первых, этот тип лекции не предполагает рассмотрение всех вопросов, касающихся данной темы. Преподаватель отбирает основные моменты, которые позволят студенту лучше усвоить материал. Вторая особенность вводной лекции – проблемное раскрытие темы. Этим достигается необходимая глубина рассмотрения основных вопросов и целенаправленное внимание студентов при слушании лекции, формирование у них проблемного мышления. Цель вводной лекции – «ввести» в научную дисциплину, помогает понять ее предмет, методологию и т.д. 2. Обзорная лекция носит характер повествования, которое сочетается с анализом и обобщениями. Главным в обзорной лекции является отбор и группировка материала с тем, чтобы подготовить студента к восприятию закономерностей, освещаемых в данной лекции. 3. Задача обобщающей лекции состоит в систематизации и обобщении широкого круга знаний, полученных студентами в процессе изучения конкретной темы. В данном случае преподаватель имеет возможность ссылаться на известные студентам факты и события и раскрывать соответствующие закономерности. Основное требование к обобщающей лекции, как и к обзорной, – проблемность ее содержания. Проблемы, рассматриваемые в данном типе лекции, являются ее логической основой. Выделяют и другие формы лекций: лекция-беседа («диалог с аудиторией»), лекция-дискуссия, лекция-консультация. Важным критерием в работе с лекционным материалом является подготовка студентов к сознательному восприятию преподаваемого материала. При подготовке студента к лекции необходимо, во-первых, психологически настроиться на эту работу, осознать

необходимость ее систематического выполнения. Во-вторых, необходимо выполнение познавательно-практической деятельности накануне лекции (просматривание записей предыдущей лекции для восстановления в памяти ранее изученного материала; ознакомление с заданиями для самостоятельной работы, включенными в программу, подбор литературы) Подготовка к лекции мобилизует студента на творческую работу, главными в которой являются умения слушать, воспринимать, записывать. Лекция – это один из видов устной речи, когда студент должен воспринимать на слух излагаемый материал. Внимательно слушающий студент напряженно работает – анализирует излагаемый материал, выделяет главное, обобщает с ранее полученной информацией и кратко записывает. Записывание лекции – творческий процесс. Запись лекции крайне важна. Это позволяет надолго сохранить основные положения лекции; способствует поддержанию внимания; способствует лучшему запоминанию материала. Для эффективной работы с лекционным материалом необходимо зафиксировать название темы, план лекции и рекомендованную литературу. После этого приступить к записи содержания лекции. В оформлении конспекта лекции важным моментом является необходимость оставлять поля, которые потребуются для последующей работы над лекционным материалом. Завершающим этапом самостоятельной работы над лекцией является обработка, закрепление и углубление знаний по теме. Необходимо обращаться к лекциям неоднократно. Первый просмотр записей желательно сделать в тот же день, когда все свежо в памяти. Конспект нужно прочитать, заполнить пропуски, расшифровать некоторые сокращения. Затем надо ознакомиться с материалом темы по учебнику, внести нужные уточнения и дополнения в лекционный материал.

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Методика изучения раздела «Основы Механики»

Научно-методический анализ раздела «Основы Механики»: основные понятия и законы, изучаемые в разделе, идея относительности в механике, координатно-векторный способ описания движения.

Научно-методический анализ и методика формирования понятий: система отсчета, перемещение, скорость, ускорение, масса, сила, импульс, работа, энергия, колебательный процесс, амплитуда, период, частота, фаза колебания.

Научно-методический анализ и методика изучения уравнений движения, законов Ньютона, законов сохранения, механических колебаний и волн.

Методика изучения раздела «Основы МКТ и термодинамики»

Научно-методический анализ раздела «Основы молекулярно-кинетической теории и термодинамики»: основные понятия и законы, изучаемые в разделе; термодинамический и статистический методы изучения тепловых явлений, их единство; отражение молекулярно-кинетической теории строения вещества в содержании раздела.

Научно-методический анализ и методика формирования у учащихся понятий теплового равновесия, температуры, внутренней энергии, необратимости. Методика формирования у учащихся статистических представлений при изучении молекулярной физики.

Научно-методический анализ и методика изучения основных положений молекулярно-кинетической теории строения вещества, молекулярно-кинетической теории идеального газа, строения и свойств жидкостей и твердых тел, принципов работы тепловых двигателей, законов термодинамики.

Методика изучения раздела «Электричество и магнетизм»

Научно-методический анализ раздела «Электричество и магнетизм»: основные понятия и законы, изучаемые в разделе, возможные подходы к формированию понятия электромагнитного поля, отражение теории Максвелла в содержании раздела, вопросы классической электронной теории проводимости.

Научно-методический анализ методика формирования понятий: электрический заряд, электромагнитное поле, напряженность, потенциал, разность потенциалов, напряжение, ЭДС, емкость, магнитная индукция, индуктивность, магнитный поток, ЭДС индукции.

Научно-методический анализ и методика изучения электростатики, законов постоянного тока, магнитного поля, электрического тока в различных средах, электромагнитной индукции, элементов специальной теории относительности, электромагнитных колебаний и волн, волновых свойств света.

Методика изучения раздела «Оптика. Квантовая природа излучения»

Научно-методический анализ раздела «Оптика. Квантовая природа излучения»: основные понятия и законы, изучаемые в разделе, элементы квантовой теории в содержании раздела.

Научно-методический анализ и методика изучения явления фотоэффекта, постулатов Бора, неравенства Гейзенберга, строения атома и атомного ядра, элементарных частиц.

Методические рекомендации для подготовки к выполнению лабораторной работы

1. Целями лабораторных работ являются изучение специальных понятий и терминов в области физики, устройства и принципа действия приборов, требований стандартов к показателям качества материалов, освоение стандартных методик определения основных параметров и показателей качества материалов, расчетных формул и методов обработки результатов, а также методов неразрушающих испытаний.

2. Приступая к лабораторным занятиям, студент должен изучить методические указания к лабораторной работе.

3. Каждая лабораторная работа содержит основные сведения и задание студенту для самостоятельной подготовки.

4. В основных сведениях даны определения специальных понятий, описание приборов и методов испытаний, методические рекомендации по выполнению работы в лаборатории, порядок расчета показателей и их значение при оценке качества материалов.

5. Готовясь к выполнению работы, студент в журнале лабораторных работ должен сформулировать цель работы и ее основные задачи.

6. Готовность студента к выполнению работы проверяется в собеседовании с преподавателем, после представления предварительно оформленной лабораторной работы в журнале. Студенты, допущенные к лабораторным занятиям, получают задание на выполнение лабораторной работы.

7. На лабораторных занятиях в соответствии с заданием и дополнительными указаниями, полученными от преподавателя, студент производит различные экспериментальные измерения, результаты которых студент заносит в журнал лабораторных работ. После обсуждения полученных результатов с преподавателем студент окончательно оформляет отчет. Оформленная лабораторная работа представляется преподавателю для проверки и повторного собеседования для получения зачета по выполненной работе.

Оформление отчета по лабораторной работе

Отчет о лабораторной работе содержит пять разделов.

1. **Цель работы** формулируется студентом исходя из темы лабораторной работы, данных, приводимых в лабораторном практикуме или методических указаниях. Цель работы должна быть изложена кратко и отражать существо рассматриваемого вопроса.

2. **Приборы и материалы.** Приводится перечень всех необходимых материалов и оборудования для выполнения лабораторной работы.

3. **Основные сведения.** Приводятся основные понятия из области методов испытания, физико-механических свойств материалов, которые необходимы в данной лабораторной работе.

4. **Методика проведения работы.** В журнале выполняются схемы приборов и установок для определения соответствующих показателей свойств или параметров материалов с полной спецификацией деталей и узлов. Приводятся описание приборов или установок и кратко принцип их работы, а также методика отбора и подготовки образцов испытуемых материалов с обязательной ссылкой на соответствующие государственные стандарты. Затем приводятся методики испытаний и расчета показателей с указанием размерности в СИ.

5. **Экспериментальная часть.** После испытаний студент заносит в журнал первичные результаты (например, массу до и после намокания образца). Имея первичные результаты, студент по формулам рассчитывает соответствующие показатели, заносит результаты в сводную таблицу.

6. **Выводы.** По результатам лабораторной работы студент обязан сделать выводы, которые основываются на сравнении показателей использованных материалов, оценке тенденций изменений показателей свойств под действием различных факторов, а также на соответствии полученных результатов требованиям государственных стандартов или другой научно-технической документации.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЭКЗАМЕНАМ

Изучение каждой дисциплины заканчивается определенными методами контроля, к которым относятся: текущая аттестация, зачеты и экзамены. Требования к организации подготовки к экзаменам те же, что и при занятиях в течение семестра, но соблюдаться они должны более строго. При подготовке к экзаменам у студента должен быть хороший учебник или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра. Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения, используя при этом опорные конспекты лекций. Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний. Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала или при решении задач у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

САМОПРОВЕРКА

После изучения определенной темы по записям в конспекте и учебнику, а также решения достаточного количества соответствующих задач на практических занятиях и самостоятельно студенту рекомендуется, используя лист опорных сигналов, воспроизвести по памяти определения, выводы формул, формулировки основных положений и доказательств. В случае необходимости нужно еще раз внимательно разобраться в материале. Иногда недостаточность усвоения того или иного вопроса выясняется только при изучении дальнейшего материала. В этом случае надо вернуться назад и повторить плохо усвоенный материал. Важный критерий усвоения теоретического материала - умение решать задачи или пройти тестирование по пройденному материалу. Однако следует помнить, что правильное решение задачи может получиться в результате применения механически заученных формул без понимания сущности теоретических положений.

КОНСУЛЬТАЦИИ

Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала или при решении задач у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения.