

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам

по дисциплине «Физика»

для студентов направления подготовки

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(Направленность (профиль) «Автомобили и автомобильное хозяйство»)

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 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 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;
- развитие творческих способностей в процессе выполнения экспериментальных заданий;
- 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;
- использования современных информационных технологий для поиска, переработки и представления информации по физике;
- использования приобретенных знаний и умений для решения задач, возникающих в профессиональной деятельности.

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 $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, 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:

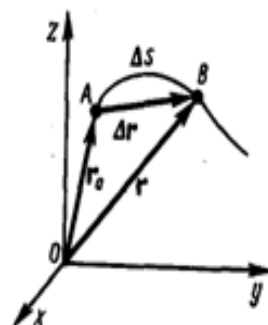


Рис. 1

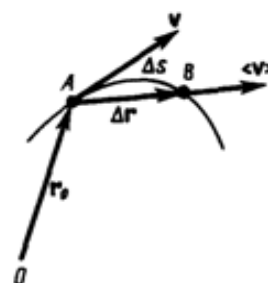


Рис. 2

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

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:

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

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).

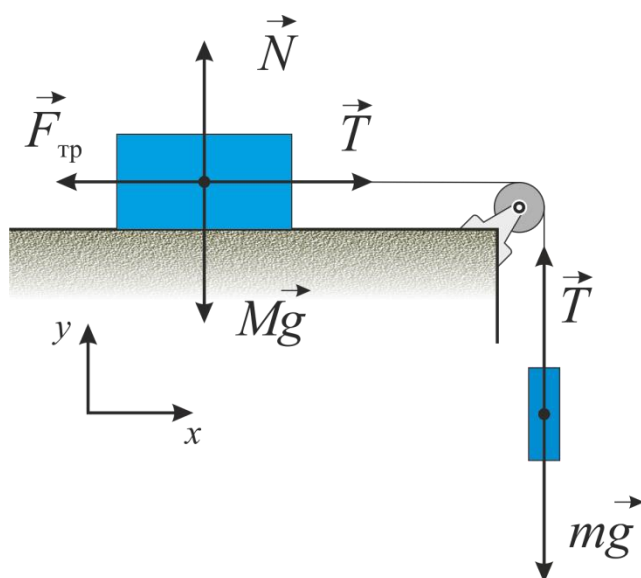


Рис. 3

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

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

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.

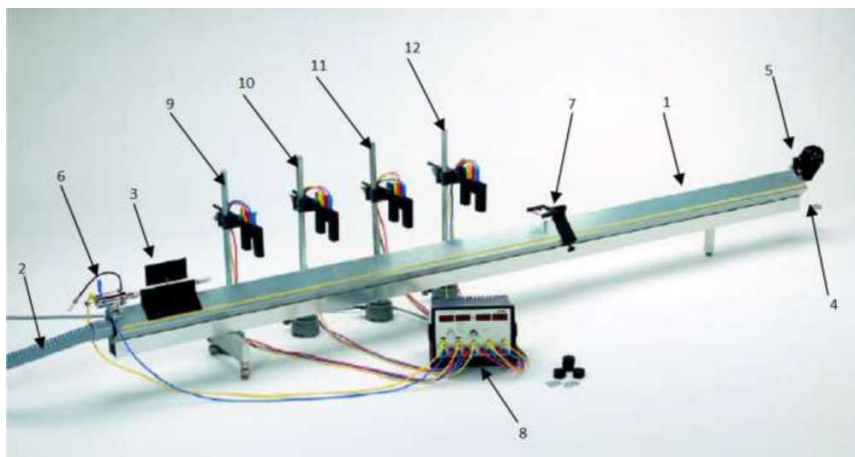


Рис.4. Экспериментальная установка для изучения равноускоренного движения

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. 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 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 $\langle v \rangle_i = \frac{s_i}{\langle t \rangle_i}$.
11. Результаты занести в таблицу отчета.
12. Для равноускоренного движения эти скорости равны соответствующим мгновенным скоростям $v(t)$ на этих участках в моменты времени

$$t = \frac{t_i}{2} \quad (9)$$

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 уравнивать 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).

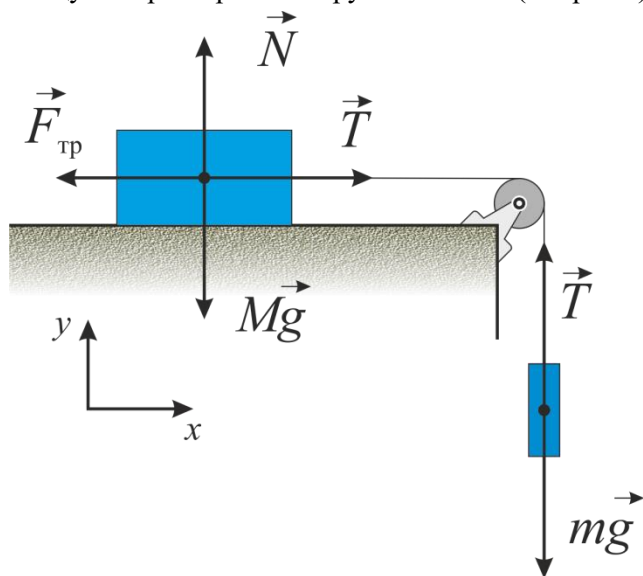


Рис. 1

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 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

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

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. 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.

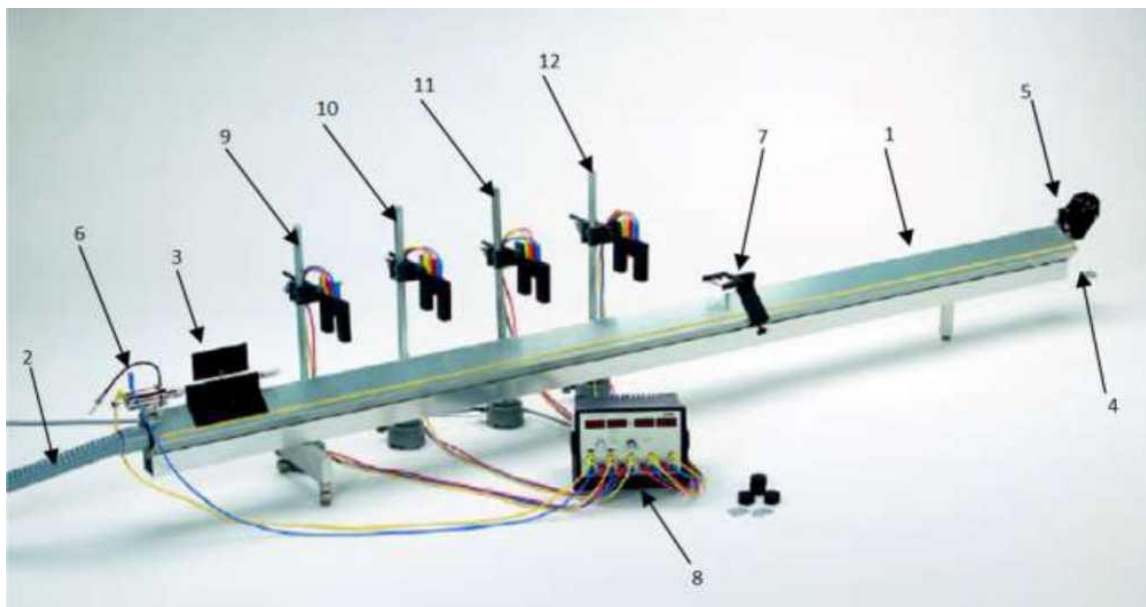


Рис.2. Экспериментальная установка для изучения равноускоренного движения

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 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 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

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- ная	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:

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

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

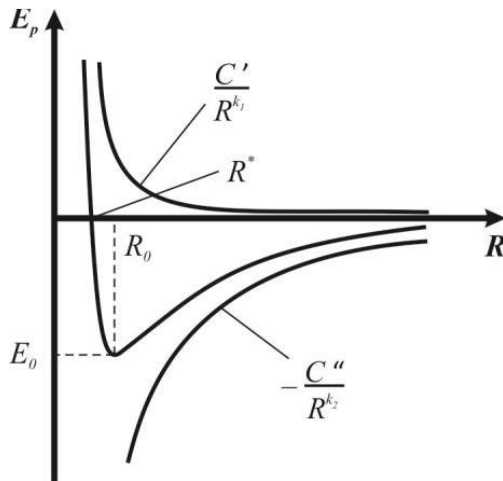


Рис. 2 а

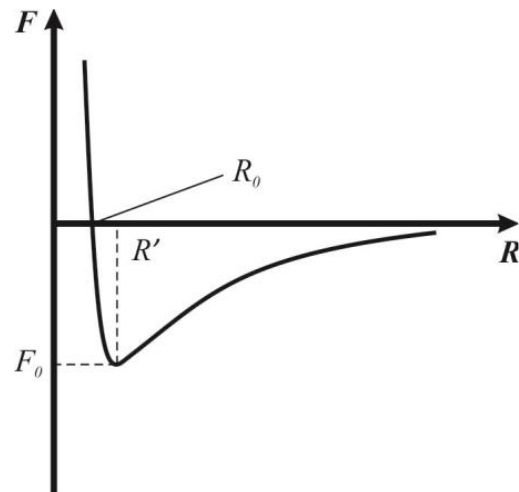


Рис. 2 б

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. 10.26 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

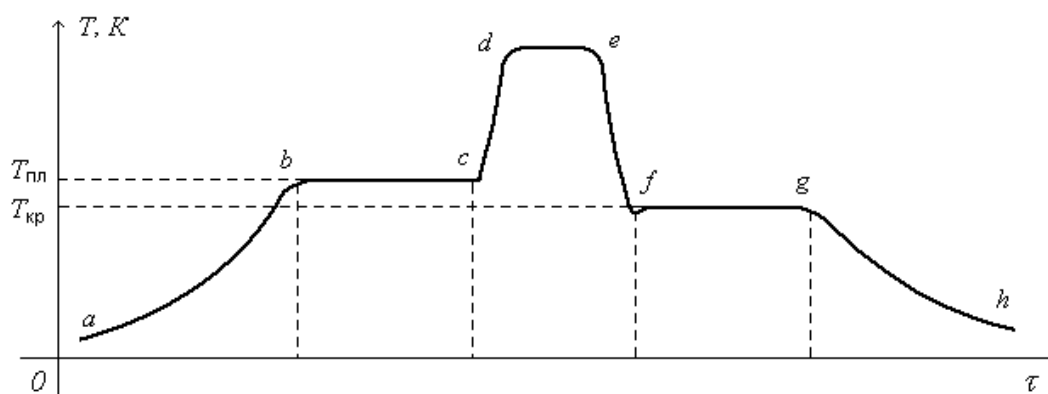


Рис. 3. Кривые плавления кристаллического тела.

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.

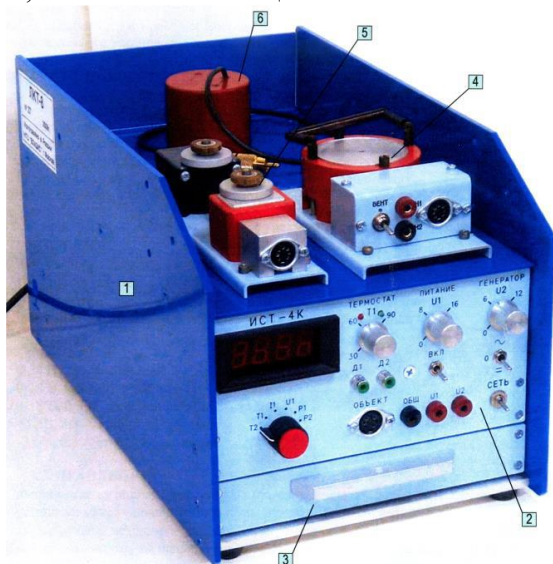


Рис. 5

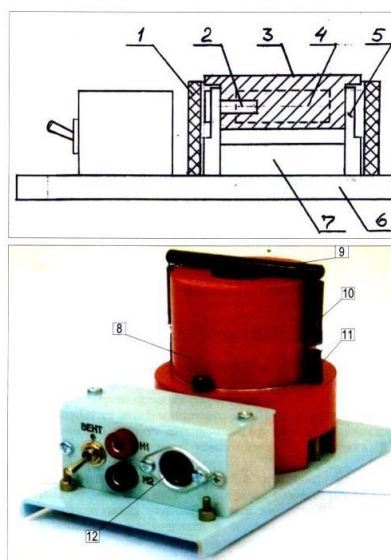


Рис.6

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 4 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).

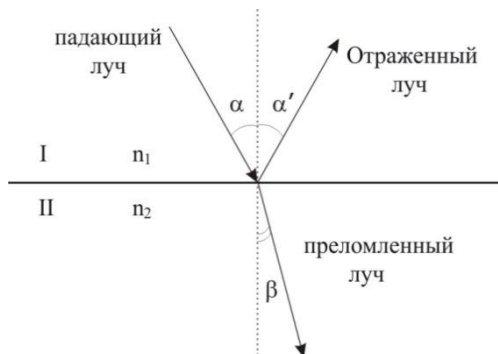


Рис.1

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:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (1)$$

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:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (4)$$

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 $\beta > \alpha$. С увеличением угла падения α увеличивается угол преломления β , это происходит до тех пор, пока при некотором угле падения $\alpha = \alpha_{np}$ угол преломления β не окажется равным $\frac{\pi}{2}$. Угол α_{np} называется предельным углом. При углах падения $\alpha > \alpha_{np}$ весь падающий свет полностью отражается.

Приближение угла падения α к предельному α_{np} приводит к уменьшению интенсивности преломленного луча и увеличению интенсивности отраженного. В случае когда $\alpha = \alpha_{np}$, интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего. Таким образом, при углах падения в пределах от α_{np} 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 α_{np} может быть найдено из формулы (4), подстановкой в нее $\beta = \frac{\pi}{2}$, тогда:

$$\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (5)$$

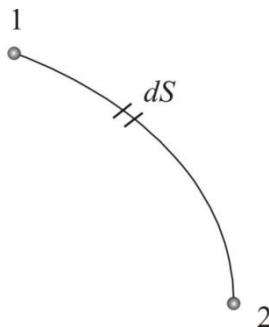


Рис. 2

Уравнение (5) удовлетворяет значениям угла α_{np} 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 τ , которое затрачивает свет на прохождение пути 1-2, будет равно:

$$\tau = \frac{1}{c} \int_1^2 ndS = \frac{L}{c}, \quad (6)$$

где $L = \int ndS$ – 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 $AO'B = A'O'B$ будет больше (точка A' – это зеркальное изображение точки A).

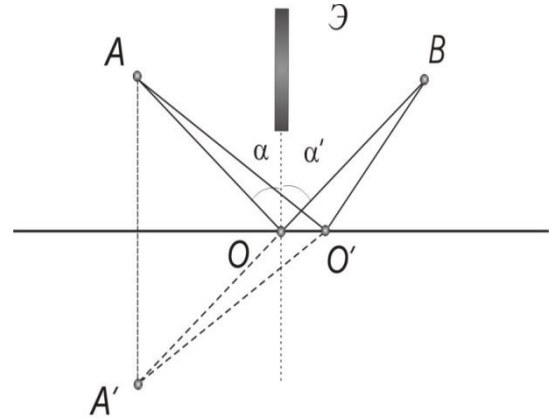


Рис. 3

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.

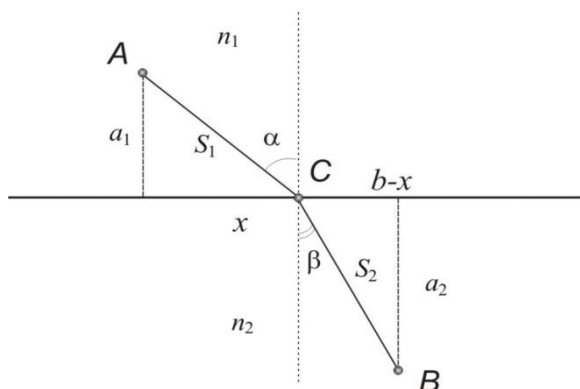


Рис. 4

Экспериментальная установка

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

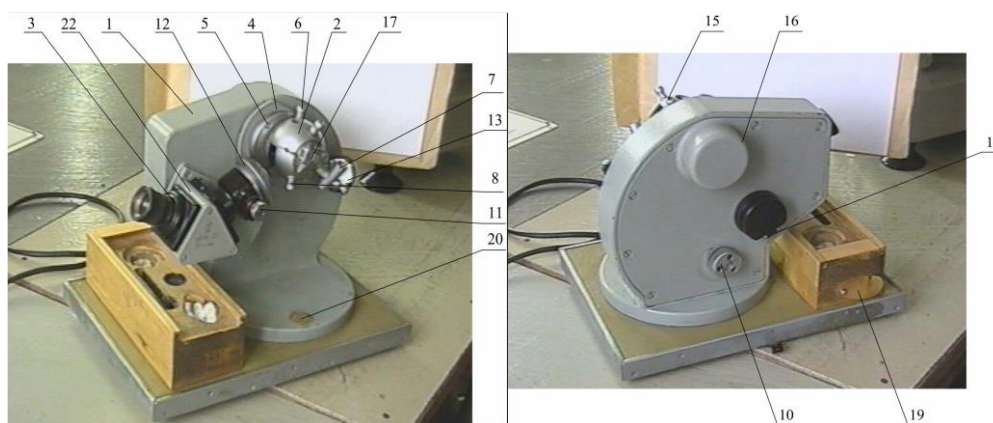


Рис. 5. Рефрактометр ИРФ-22

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 граничная 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.

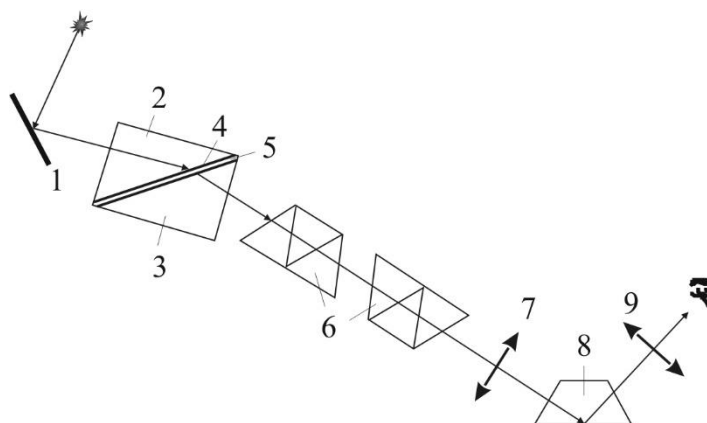


Рис. 6. Ход луча в рефрактометре ИРФ-22.

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

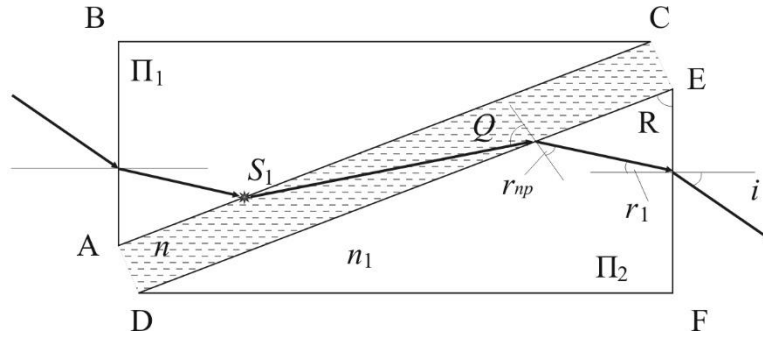


Рис. 7. Ход луча в призмах рефрактометра ИРФ-22

Рассмотрим прохождение света через грань EF измерительной призмы П₂. Как видно из рис. 7 применяя дважды закон преломления на гранях DE и EF, можно получить два соотношения:

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

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

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

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

Преломляющий угол R призмы П₂ связан с углами r и r_1 равенством:

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

Задав углу Q максимальное значение $Q_{\max} = \frac{\pi}{2}$ (луч S_1S_2 становится "скользящим"), из выражения (8) следует, что r тоже будет иметь максимальное значение: $r = r_{\max}$. Соответственно 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:

$$\begin{aligned} n_{ж} &= \frac{\sin i_{\min}}{\sin r_{1\min}} \cdot \sin(R - r_{1\min}) = \sin i_{\min} \cdot \left[\frac{\sin R}{\sin r_{1\min}} \cdot \cos r_{1\min} - \cos R \right] = \\ &= \sin i_{\min} \cdot \sin R \sqrt{\frac{1}{\sin^2 r_{1\min}} - 1} - \cos R \cdot \sin i_{\min} \end{aligned}$$

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

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

Таким образом, для определения показателя преломления исследуемой жидкости $n_{ж}$ необходимо знать значение $i_{\min}$ – угла выхода предельного луча из П₂ 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 .

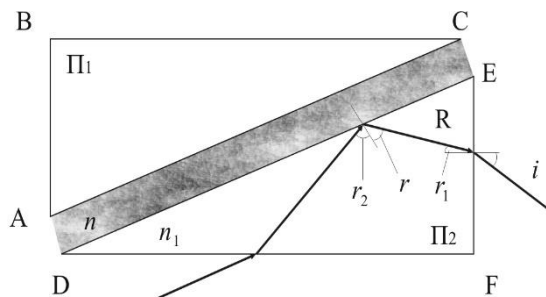
Как показано выше показатель преломления исследуемой жидкости связан с наименьшим углом i_m соотношением (12), однако для определения показателя преломления жидкости с помощью рефрактометра ИРФ-22 нет необходимости пользоваться данной формулой, поскольку отсчетная шкала уже проградуирована в значениях 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 $r_2 > r_1$ будет происходить полное внутренне отражение, если $r_2 < r_1$ – 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 $\Delta n = n_{изм.} - 1,333$. 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 5 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 проволоочной 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**:

- 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.

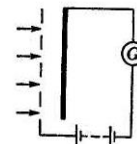


Рис. 1

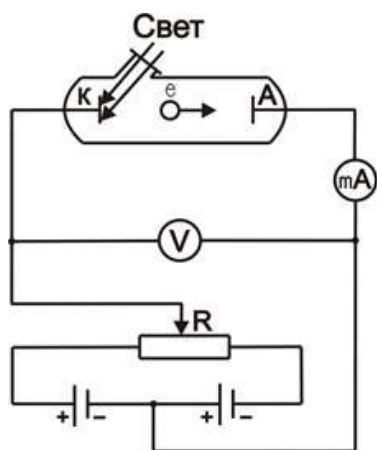


Рис. 2

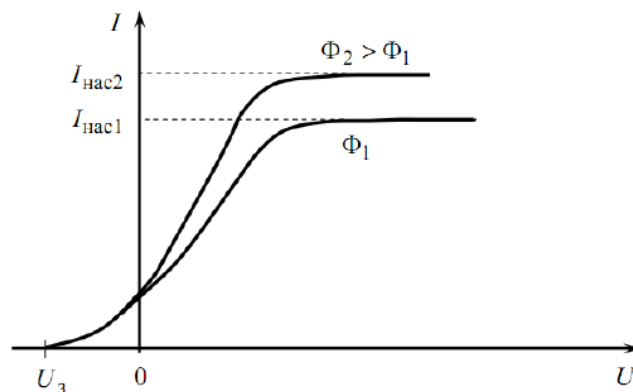


Рис. 3

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
$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	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 ν от интенсивности света не зависят (II закон фотоэффекта). Так как с уменьшением частоты света

кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A_{\text{вых}} = \text{const}$), 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.

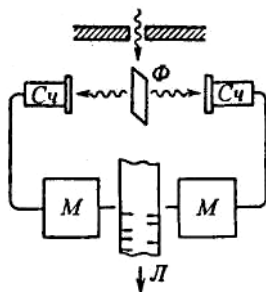
Как и любая материальная частица, фотон имеет массу m_{ϕ} , которая связана с его энергией релятивистской формулой: $m_{\phi}c^2 = \varepsilon_{\phi}$. С учетом (3) находим:

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

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.



Тонкая металлическая фольга Φ помещалась между двумя газоразрядными счетчиками Сч . Фольга освещалась слабым пучком рентгеновских лучей. Вследствие малой интенсивности первичного пучка количество квантов, испускаемых фольгой, было невелико. При попадании в него рентгеновских лучей счетчик срабатывал и приводил в действие особый механизм М , делавший отметку на движущейся ленте Л . Если бы излучаемая энергия распространялась равномерно во все стороны, как это следует из волновых представлений, оба счетчика должны были срабатывать одновременно и отметки на ленте приходились 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:

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

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.

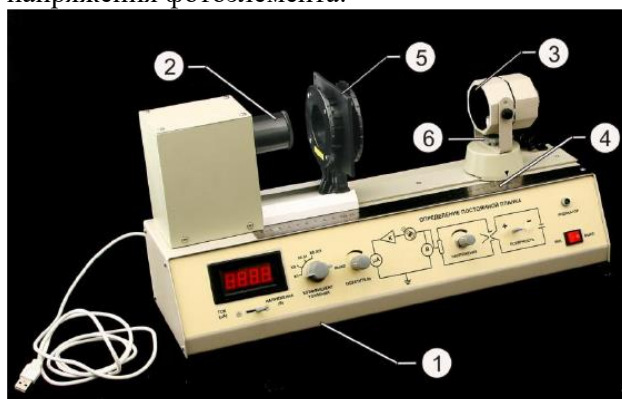


Рис. 4

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 «х0.001».
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_z , данные занесите в отчет.
5. Повторите измерения для остальных светофильтров.
6. Рассчитайте частоту падающего света $\nu = \frac{c}{\lambda}$.
7. Постройте зависимость $U_z(\nu)$.
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 6

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:

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

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

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.

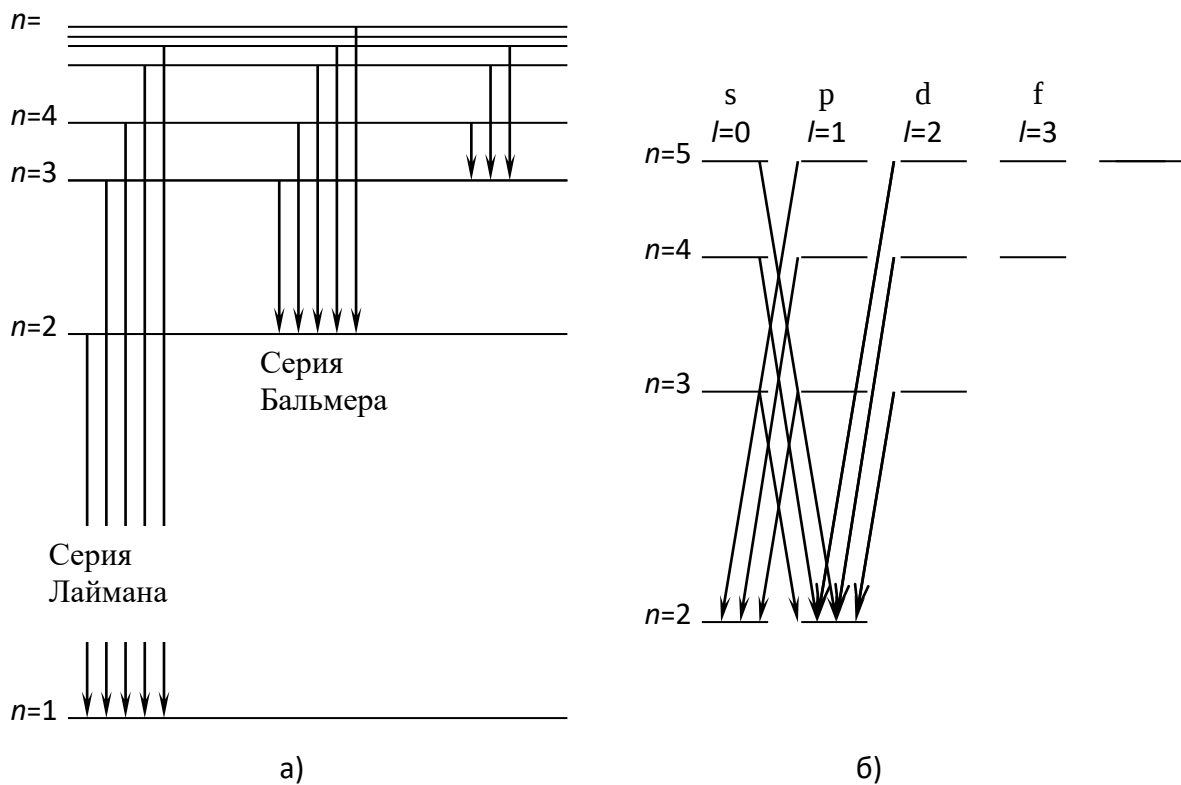


Рис.1

На рис.1б показана схема формирования серии Бальмера с учетом закона сохранения момента импульса ($\Delta l = \pm 1$). По вертикальной оси отложены значения энергии, а по горизонтали указаны состояния с различными значениями момента импульса, определяемого квантовым числом l .

Экспериментальная установка.

В настоящей работе изучается серия Бальмера, линии которой лежат в видимой области. Для измерения длин волн спектральных линий в работе используется спектроскоп (рис. 2), ход лучей в котором приведен на рис. 3.

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

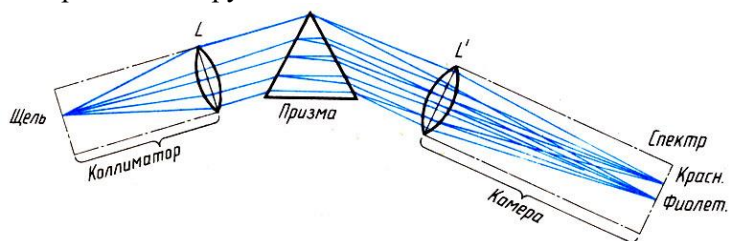


Рис. 3

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 $\tilde{\nu} = f(n^{-2})$. 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.

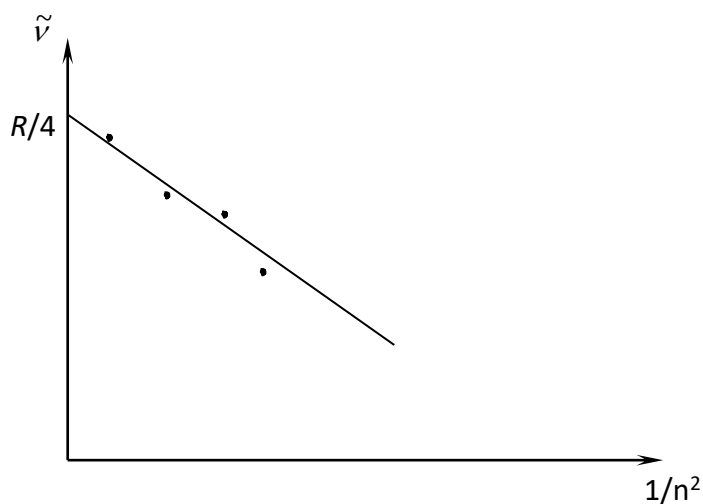


Рис.4

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.