

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
УЛЬЯНОВСКОЕ ВЫСШЕЕ АВИАЦИОННОЕ УЧИЛИЩЕ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (ИНСТИТУТ)**

**ФИЗИКА:  
ОПТИКА, ОСНОВЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**



**Ульяновск 2010**

ББК ВЗя7

Ф50

Физика: оптика, основы атомной физики : лабораторный практикум / сост. Ю. Ф. Пугачёв, С. С. Леонов, С. С. Самохина. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2010. – 70 с.

Содержит лабораторные работы по оптике и атомной физике. В описании каждой работы сформулированы цели, изложены ее основные теоретические сведения, рассмотрен принцип действия экспериментальных установок, приведен порядок ее выполнения. Даны контрольные вопросы и рекомендуемая литература, необходимая для подготовки к выполнению каждой лабораторной работы.

Предназначен для курсантов и студентов заочной формы обучения всех специальностей.

Печатается по решению Редсовета училища.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Определение концентрации и показателя преломления раствора методом полного внутреннего отражения .....	3
Лабораторная работа № 2. Проверка закона Малюса. Исследование поляризации излучения лазера .....	8
Лабораторная работа № 3. Определение концентрации оптически активного вещества с помощью поляриметра .....	17
Лабораторная работа № 4. Определение длины волны монохроматического света с помощью дифракционной решетки.....	27
Лабораторная работа № 5. Исследование характеристик теплового излучения лампы накаливания.....	39
Лабораторная работа № 6. Исследование внешнего фотоэффекта.....	48
Лабораторная работа № 7. Исследование явления радиоактивности.....	55
Приложение .....	69
Рекомендуемая литература.....	70

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ РАСТВОРА МЕТОДОМ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить разделы «Световая волна», «Законы геометрической оптики» и «Дисперсия света» [1, с. 304–306; 347–353], [2, кн. 4, с. 76–81; 216–227], а также теоретическую справку к работе.

### 1.1. Цель работы

Определить концентрацию и показатель преломления водного раствора глюкозы методом полного внутреннего отражения с помощью лабораторного рефрактометра-сахариметра.

### 1.2. Расчетные зависимости

Пусть плоская световая волна падает на плоскую границу раздела двух однородных изотропных диэлектриков (рис. 1.1).

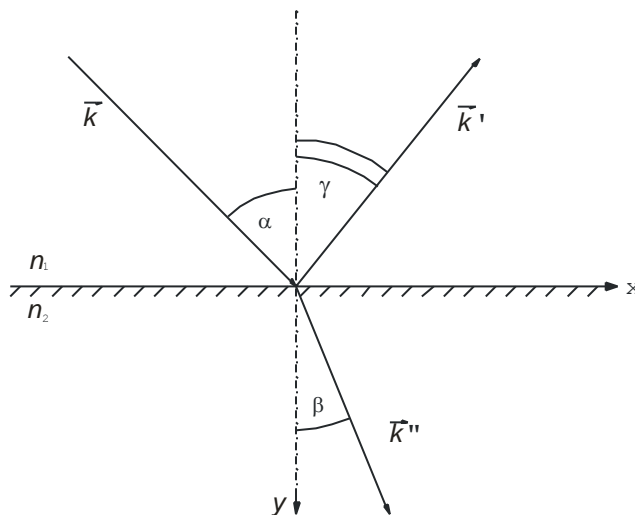


Рис. 1.1. К выводу законов отражения и преломления света

Атомы, находящиеся на границе раздела сред, будут совершать вынужденные колебания в электрическом поле падающей световой волны и переизлучать ее энергию в виде отраженной и преломленной волн. Уравнения всех трех волн соответственно запишутся в виде

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_m \exp[i(\omega t - k_x x - k_y y)]; \\ \vec{E}' &= \vec{E}'_m \exp[i(\omega' t - k'_x x - k'_y y + \varphi')]; \\ \vec{E}'' &= \vec{E}''_m \exp[i(\omega'' t - k''_x x - k''_y y + \varphi'')].\end{aligned}$$

Напряженность результирующего электрического поля в первой среде

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \vec{E} + \vec{E}' = \vec{E}_m \exp[i(\omega t - k_x x - k_y y)] + \\ &+ \vec{E}'_m \exp[i(\omega' t - k'_x x - k'_y y + \varphi')],\end{aligned}\quad (1.1)$$

а во второй

$$\vec{E}_2 = \vec{E}'' = \vec{E}''_m \exp[i(\omega'' t - k''_x x - k''_y y + \varphi'')].\quad (1.2)$$

Так как на границе раздела ( $y = 0$ ) тангенциальные составляющие напряженности электрического поля в обеих средах должны быть одинаковы, то из (1.1) и (1.2) получаем:

$$\begin{aligned}E_{m\tau} \exp[i(\omega t - k_x x)] + E'_{m\tau} \exp[i(\omega' t - k'_x x + \varphi')] &= \\ = E''_{m\tau} \exp[i(\omega'' t - k''_x x + \varphi'')].\end{aligned}\quad (1.3)$$

Уравнение (1.3) справедливо при любых  $t$  и  $x$ , поэтому должны выполняться следующие условия:

$$\omega = \omega' = \omega''$$

и

$$k_x = k'_x = k''_x.$$

Таким образом, частоты отраженной и преломленной волн совпадают с частотой падающей волны, а проекции волновых векторов этих волн на ось  $X$  равны:

$$k \sin \alpha = k' \sin \gamma = k'' \sin \beta.$$

Так как  $k = k' = \frac{\omega}{V_1}$ ,  $k'' = \frac{\omega}{V_2}$ , то последнее выражение можно переписать

в виде:

$$\frac{\omega}{V_1} \sin \alpha = \frac{\omega}{V_2} \sin \gamma = \frac{\omega}{V_3} \sin \beta,$$

откуда

$$\gamma = \alpha,\quad (1.4)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{c/V_2}{c/V_1} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.\quad (1.5)$$

Соотношение (1.4) выражает закон отражения света, согласно которому отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения, а угол отражения равен углу падения.

Соотношение (1.5) выражает закон преломления света: преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных веществ и равная отношению абсолютного показателя преломления второй среды ( $n_2$ ) к абсолютному показателю преломления первой среды ( $n_1$ ) или относительному показателю преломления второй среды относительно первой ( $n_{21}$ ).

Если свет переходит из оптически более плотной среды в менее плотную ( $n_1 > n_2$ ), то  $\alpha < \beta$ . Тогда при некотором значении угла падения  $\alpha_0$  угол преломления может стать равным  $\frac{\pi}{2}$ , и преломленный луч пойдет вдоль границы раздела сред. Такое явление называется полным внутренним отражением, а соответствующий ему угол  $\alpha_0$  – предельным углом. Используя (1.5), получаем:

$$\alpha_0 = \arcsin n_{21}.$$

### 1.3. Описание установки

В работе используется лабораторный рефрактометр-сахариметр, выполненный на основе ручного рефрактометра RR-II польского производства. Оптическая схема прибора представлена на рис. 1.2.

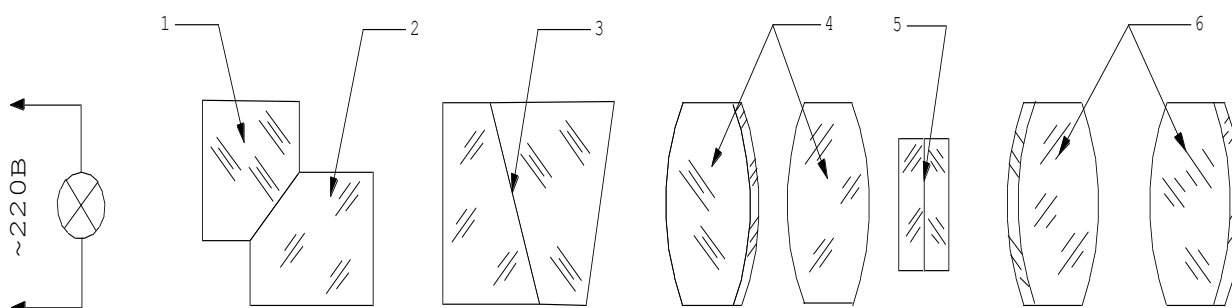


Рис. 1.2. Оптическая схема рефрактометра-сахариметра:

1 – освещающая призма; 2 – измерительная призма; 3 – компенсационная призма; 4 – объект с уравнивающей линзой; 5 – фокусная плитка с измерительной шкалой; 6 – окуляр

Перед началом работы следует поднять освещающую призму 1 за оправу и, удерживая ее на весу, тщательно протереть чистой влажной тканью поверхности призм 1, 2. Затем нанести на плоскость измерительной призмы 2 несколько капель исследуемой жидкости, опустить освещающую призму 1 и приступить к замерам. Для этого необходимо включить осветительную лампу, отрегулировать резкость изображения измерительной шкалы 5 вращением окуляра 6.

Измерительным указателем является ограничительная линия темного и светлого полей, как показано на рис. 1.3. Ограничительная линия (на рис. 1.3 указывает на 15,5 % содержания сахара в исследуемой пробе) отчетливо заметна только тогда, когда исследуемая жидкость равномерно растекается по всей поверхности измерительной призмы 2. Ее появление в поле зрения прибора связано с тем, что рассеянный матовой поверхностью освещающей призмы свет падает на слой исследуемой жидкости под различными углами. Часть световых лучей попадает под углами больше предельного угла  $\alpha_0$  и испытывает полное внутреннее отражение, не проникая в измерительную призму 2. Поскольку  $\alpha_0$  зависит от показателя преломления жидкости, проходящие через прибор лучи преломляются на вполне определенный угол, высвечивая некоторую часть поля зрения.

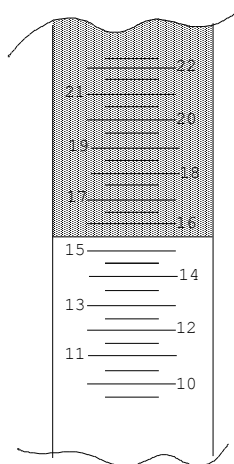


Рис. 1.3. Вид поля зрения в рефрактометре-сахариметре

Вследствие явления дисперсии в белом свете граница раздела темного и светлого полей должна быть окрашенной. Для устранения этого недостатка служит компенсационная призма 3, склеенная из двух призм прямого зрения. Собственная дисперсия этой призмы позволяет ликвидировать цветовую кайму границы раздела и повысить точность измерения.

Измерительная шкала прибора отградуирована в процентах содержания сахара, что позволяет использовать его в процессе переработки фруктов и приготовления компотов, джемов, конфет и т. п. Но так как показатель преломления раствора зависит от концентрации растворенного в нем вещества, прибором можно пользоваться и для измерения показателя преломления

жидкость равномерно растекается по всей поверхности измерительной призмы 2. Ее появление в поле зрения прибора связано с тем, что рассеянный матовой поверхностью освещающей призмы свет падает на слой исследуемой жидкости под различными углами. Часть световых лучей попадает под углами больше предельного угла  $\alpha_0$  и испытывает полное внутреннее отражение, не проникая в измерительную призму 2. Поскольку  $\alpha_0$  зависит от показателя преломления жидкости, проходящие через прибор лучи преломляются на вполне определенный угол, высвечивая некоторую часть поля зрения.

жидкостей. Соответствующий градуировочный график дан на рис. 1.4. На нем приведена зависимость показателя преломления жидкости  $n_D$  для желтого света ( $\lambda_0 = 3893$ ) от показаний шкалы сахариметра.

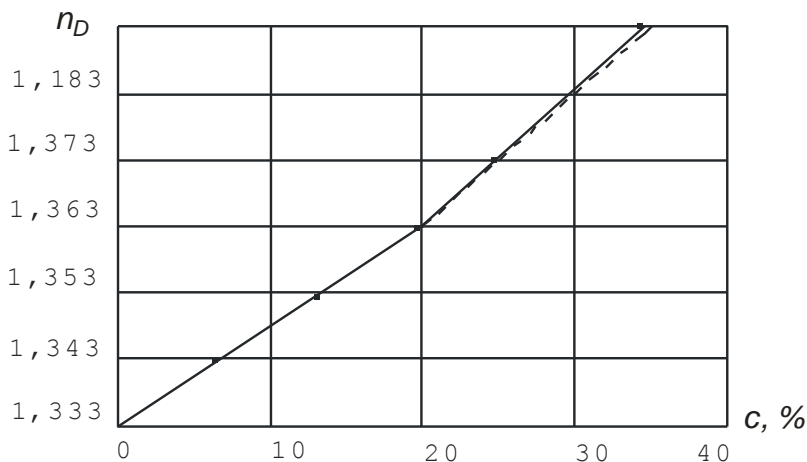


Рис. 1.4. Зависимость показателя преломления водных растворов сахара от его концентрации в растворе

#### 1.4. Порядок выполнения работы

1. Получив допуск к лабораторной работе, произвести измерение концентрации глюкозы  $C$  в исследуемом водном растворе. Количество измерений и значение доверительной вероятности  $p$  задаются преподавателем. Записать результаты прямых измерений  $C$  в таблицу и вычислить погрешности измерений.

Результаты прямых измерений  $C$

№ п/п	$C_i, \%$	$\Delta C_i, \%$	$S_{n\bar{C}}, \%$	$p$	$t_{pn}$	$\delta C, \%$	$\varepsilon, \%$	$\bar{C} \pm \delta C, \%$
1								
2								
3								
Ср.								

2. Определить  $c$  с помощью градуировочного графика, приведенного на рис. 1.4 (его необходимо воспроизвести на миллиметровой бумаге и наклеить в отчет), показатель преломления  $n_D$  исследуемого раствора и оценить погрешности его нахождения.

3. Составить отчет по установленной форме.

## 1.5. Контрольные вопросы и упражнения

1. Выведите основные законы геометрической оптики.
2. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления?
3. В чем состоит явление полного внутреннего отражения?
4. Объясните принцип действия рефрактометра-сахариметра, используемого в данной работе.
5. Длина волны света в среде с показателем преломления  $n$  определяется выражением

$$\lambda = \frac{V}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n},$$

где  $V$  и  $c$  – скорости распространения света в среде и в вакууме соответственно;  $\nu$  – частота света;  $n$  – показатель преломления среды;  $\lambda_0$  – длина световой волны в вакууме (воздухе).

В связи с этим будет ли луч красного света ( $\lambda_0 = 0,7$  мкм) казаться в воде ( $n = 1,33$ ) зеленым ( $\lambda = 0,54$  мкм)?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить раздел «Поляризация света» [1, с. 355–358], [2, кн. 4, с. 188–197], а также теоретическую справку к работе.

#### 2.1. Цель работы

1. Изучить поляризацию лазерного излучения.
2. Проверить закон Малюса путем сравнения экспериментальной и практической зависимостей интенсивности света, пропускаемого через систему последовательно расположенных поляризатора и анализатора, от угла между их главными плоскостями.



## 2.2. Расчетные зависимости

Свет представляет собой электромагнитные волны длиной волны в вакууме от 400 до 770 нм. Электромагнитная волна при распространении в однородной изотропной диэлектрической среде является поперечной волной, т. е. вектор напряженности электрического поля в такой волне колеблется перпендикулярно направлению ее распространения.

В излучении источников естественного света (ЕС) в результате несогласованного излучения отдельных атомов имеет место колебание вектора  $\vec{E}$  напряженности электрического поля по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения (рис. 2.1, а).

Свет, в котором направления колебаний вектора  $\vec{E}$  каким-либо образом упорядочены, называется *поляризованным*. Если колебания вектора напряженности электрического поля световой волны происходят только в одной плоскости (рис. 2.1, б), то такой свет называется *плоскополяризованным светом* (ППС).

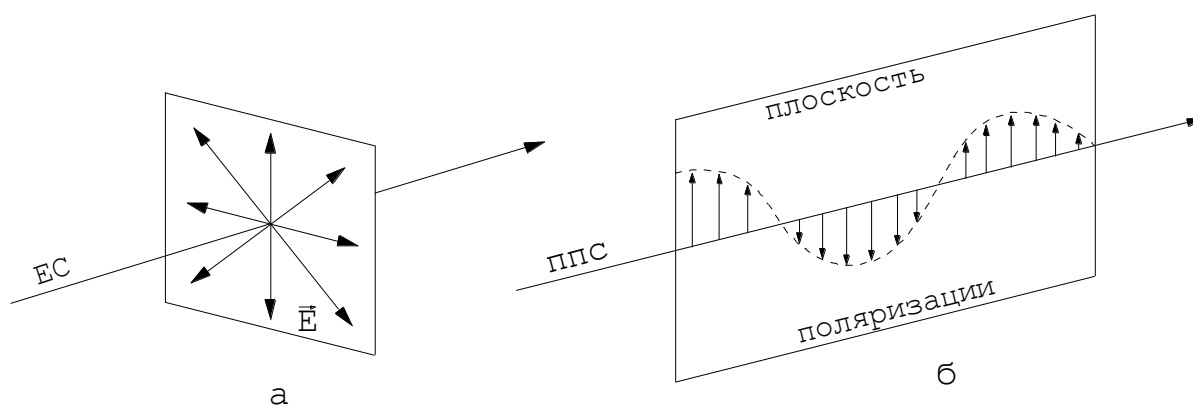


Рис. 2.1. Характер колебаний вектора напряженности электрического поля в естественном (а) и плоскополяризованном (б) свете

Плоскость, в которой колеблется вектор  $\vec{E}$ , называется плоскостью поляризации света.

Во избежание недоразумений отметим, что в старых книгах по оптике эту плоскость называют плоскостью колебаний, а под плоскостью поляризации понимают плоскость, в которой колеблется вектор напряженности магнитного поля световой волны  $\vec{H}$ .

Устройства для получения плоскополяризованного света называются поляризаторами. Поляризатор свободно пропускает колебания, параллельные

некоторому направлению, которое называют главным направлением поляризатора. Плоскость, содержащая световой луч и главное направление поляризатора, называется главной плоскостью поляризатора. Таким образом, свет, поляризованный в главной плоскости поляризатора, проходит через него без ослабления, а свет, поляризованный перпендикулярно главной плоскости, полностью задерживается.

Если плоскость поляризации падающего на поляризатор ППС образует с его главной плоскостью угол  $\alpha$ , то через поляризатор пройдет лишь та составляющая световой волны, у которой вектор напряженности электрического поля параллелен главному направлению поляризатора (рис. 2.2):

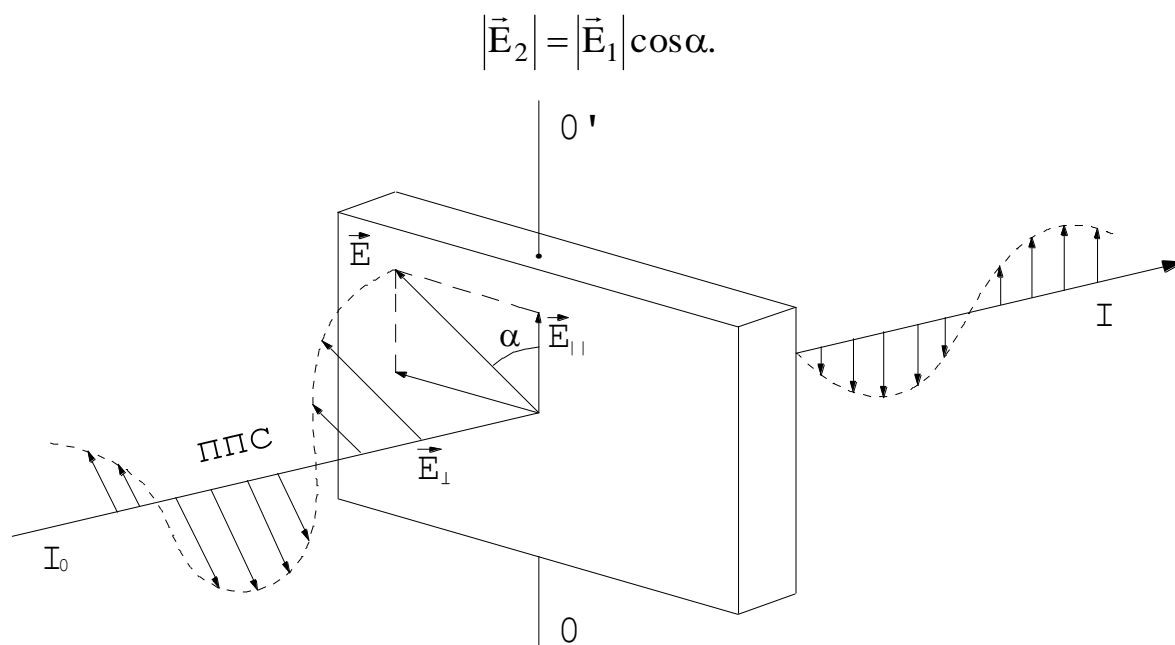


Рис. 2.2. Прохождение плоскополяризованного света через поляризатор  $OO'$  – главное направление поляризатора

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды колебаний напряженности его электрического поля ( $I_0 \approx E_m^2; I \approx E_{\parallel, m}^2$ ), то интенсивность  $I$  света, прошедшего через поляризатор, связана с интенсивностью  $I_0$  падающего на него света следующим соотношением:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (2.1)$$

Выражение (2.1) называется законом Малюса в честь открывшего его в 1808 г. французского физика Этьена Луи Малюса.

Если на поляризатор падает ЕС интенсивности  $I_*$ , для которого равновесны все значения угла  $\alpha$  в пределах от 0 до  $2\pi$ , то интенсивность пропущенного им ППС  $I_0 = I_* \langle \cos^2 \alpha \rangle$ .

Так как среднее за период значение  $\cos^2 \alpha$  равно 1/2, то

$$I_0 = \frac{1}{2} I_* . \quad (2.2)$$

### 2.3. Описание установки

Используемая в настоящей работе установка представлена на рис. 2.3.

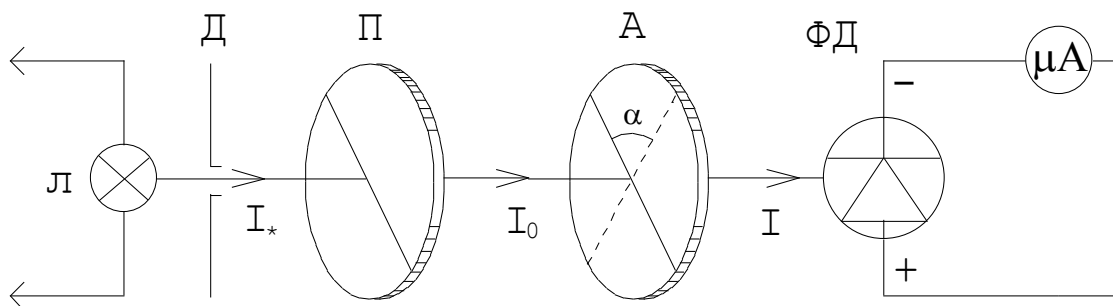


Рис. 2.3. Принципиальная схема установки для проверки закона Малюса:

Л – электрическая лампа накаливания или лазерный излучатель; Д – диафрагма со щелью; П – поляризатор; А – анализатор; ФД – фотодатчик;  $\mu A$  – микроамперметр

Испускаемый лампой естественный свет интенсивностью  $I_*$ , пройдя через поляризатор  $П$ , становится плоскополяризованным. В соответствии с (2.2), его интенсивность при этом уменьшается вдвое:  $I_0 = I_* / 2$ . Далее свет падает на анализатор  $А$ , который конструктивно ничем не отличается от  $П$  и служит лишь для анализа характера поляризации падающего на него света. Согласно закону Малюса (2.1), интенсивность света, прошедшего через  $А$ , равна:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha ,$$

где  $\alpha$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Пропущенный анализатором свет попадает на фотодатчик  $ФД$ , в качестве которого использован фотодиод. Принцип действия фотодиода основан на внутреннем фотоэффекте – свойстве некоторых полупроводников под действием света генерировать ЭДС за счет образования дополнительных свободных носителей заряда (электронов и дырок).  $ФД$  подключен к микроамперметру  $\mu A$ . При отсутствии освещения через него протекает ничтожно

малый ток, называемый темновым током. При освещении  $\Phi Д$  в цепи возникает фототок  $I_{\phi}$ , пропорциональный интенсивности падающего на него света. Это позволяет экспериментально проверить закон Малюса, регистрируя изменение фототока при повороте поляризатора относительно анализатора.

Если главная плоскость  $A$  составляет угол  $90^\circ$  с главной плоскостью  $\Pi$  (поляризатор и анализатор скрещены), то интенсивность света, воспринимаемого глазом за  $A$ , будет равна нулю в полном соответствии с (2.1). Однако через  $\Phi Д$  при этом будет протекать некоторый минимальный фототок  $(I_{\phi})_{\min}$ , отличный от нуля. Это связано с тем, что спектральная чувствительность  $\Phi Д$  отлична от спектральной чувствительности глаза:  $\Phi Д$  регистрирует излучение, выходящее за пределы диапазона длин волн видимого света.

Поэтому для проверки закона Малюса следует изучить зависимость

$$i = i_{\max} \cdot f(\alpha), \quad (2.3)$$

где  $i = I_{\phi} - (I_{\phi})_{\min}$ , а  $i_{\max}$  – максимальное значение фототока  $i$ , наблюдаемое при параллельности главных плоскостей  $\Pi$  и  $A$ .

Конструктивно настольная установка выполнена следующим образом (рис. 2.4):

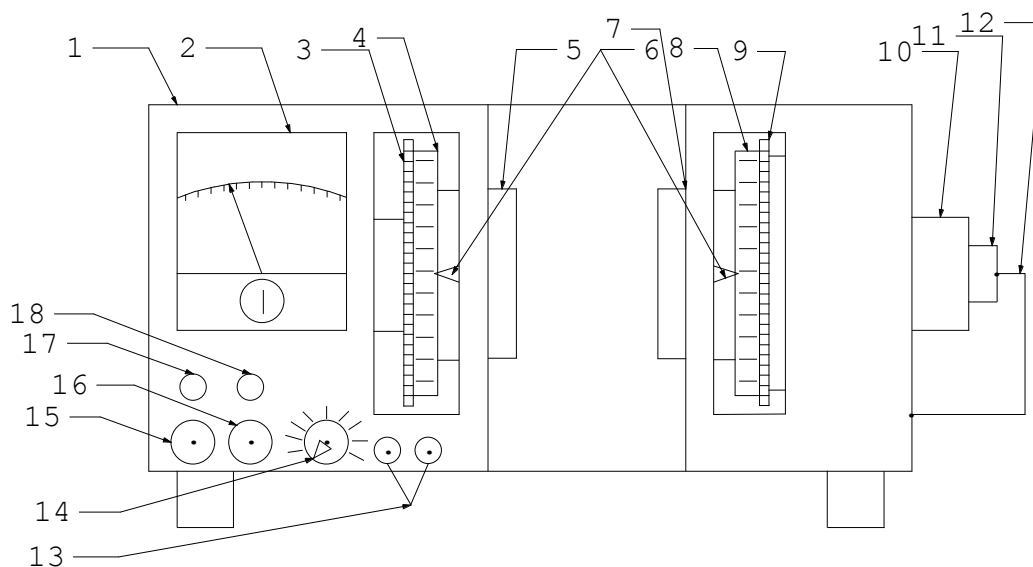


Рис. 2.4. Общий вид лабораторной установки:

1 – корпус; 2 – микроамперметр фотодатчика; 3 – опорная пластина вращающегося блока анализатора; 4 – шкала вращающегося блока анализатора; 5 – анализатор с держателем; 6 – указатель шкалы; 7 – поляризатор с держателем; 8 – шкала вращающегося блока поляризатора; 9 – опорная пластина вращающегося блока поляризатора; 10 – держатель лазерного излучателя; 11 – лазерный излучатель; 12 – провод питания лазерного излучателя; 13 – гнезда «Осциллограф»; 14 – регулятор частоты вращения вращающегося блока анализатора; 15 – включатель привода; 16 – включатель питания; 17 – индикатор включения питания; 18 – индикатор включения привода

В корпусе на промежуточных опорах установлены вращающиеся блоки поляризатора и анализатора со шкалами и указателями положения шкал, а также блок питания, электрический привод вращения блока анализатора, фотодатчик, микроамперметр, органы управления и съемный осветитель лампы накаливания или полупроводникового лазерного излучателя.

Вращающийся блок анализатора имеет электрический привод с регулируемой частотой вращения. Привод вращения анализатора состоит из электродвигателя постоянного тока с установленным на его валу шкивом, приводного ремня, электронного регулятора частоты вращения с рукояткой управления и тумблера включения привода. Опорная пластина вращающегося блока анализатора имеет зубцы, обеспечивающие возможность его вращения вручную. На опорной пластине в держателе установлен анализатор.

Опорная пластина вращающегося блока поляризатора имеет зубцы, обеспечивающие возможность его вращения вручную. На опорной пластине в держателе установлен поляризатор.

Блок питания предназначен для питания осветителя постоянным стабилизированным напряжением, а также для питания электрического привода вращения блока анализатора. Установлен в левом боковом отсеке установки.

Фотодатчик представляет собой фотодиод, работающий в активном режиме (т. е. режиме возбуждения фотоЭДС). Установлен в левом боковом отсеке установки вместе с блоком питания и вырабатывает фотоЭДС, пропорциональную интенсивности прошедшего через анализатор светового потока.

Измеритель тока фотоэлектрического датчика представляет собой стандартный микроамперметр М-96 класса точности 1.0 с током полного отклонения 100 мкА. Находится в левом боковом отсеке установки перед блоком питания.

Осветитель крепится к правой боковой стенке установки. В качестве источника излучения используется лампа накаливания или полупроводниковый лазерный излучатель. Лазерный излучатель представляет собой бытовую лазерную указку на основе полупроводникового лазерного излучающего диода, доработанную с целью обеспечения питания от внешнего источника постоянного тока.

В случаях, когда излучение лазера является плоскополяризованным, при повороте главной плоскости анализатора относительно плоскости поляризации света интенсивность светового потока будет изменяться от нуля до максимального значения. Поэтому если при вращении анализатора относительно неподвижного лазерного излучателя наблюдается изменение интенсивности светового потока, регистрируемого фотодатчиком, то лазерное излучение поляризовано. При отсутствии поляризации излучения ток будет иметь постоянную величину и не изменяться при повороте главной плоскости анализатора.

При достаточно быстром вращении анализатора закон изменения интенсивности светового потока можно наблюдать на экране осциллографа. Для обеспечения этого служит электрический привод вращения блока анализатора, позволяющий регулировать частоту вращения анализатора от 0 до 600 мин<sup>-1</sup> и получать устойчивое изображение сигнала фотодатчика на экране осциллографа.

## **2.4. Порядок выполнения работы**

### **Подготовка установки к работе**

1. Установить осветитель с лазерным излучателем (в работе предусмотрена замена лазерного излучателя на лампу накаливания).
2. Убедиться в том, что все органы управления установкой находятся в исходном положении.
3. Включить установку в сеть.
4. Включить привод блока вращения анализатора *15* и, вращая ручку регулировки частоты вращения *14*, убедиться в том, что частота вращения привода изменяется от 0 до 600 мин<sup>-1</sup>.
5. Снизить частоту вращения привода до 150–200 мин<sup>-1</sup>.
6. Вращая блок вращения поляризатора от 0° до 360°, убедиться в том, что показания микроамперметра изменяются от нуля до максимального значения.
7. Снизить частоту вращения привода блока анализатора до 0 и выключить привод.
8. Выключить установку.

## **Исследование поляризации излучения лазера**

1. Включить установку.
2. Включить привод вращения блока анализатора и установить его частоту вращения в пределах  $200\text{--}300\text{ мин}^{-1}$ .
3. Вращая блок вращения поляризатора от  $0$  до  $360^\circ$  с интервалом в  $4^\circ$ , снять показания микроамперметра и занести значения в таблицу. Построить график зависимости величины фототока от угла поворота поляризатора.
4. Поставить блок вращения поляризатора в положение, при котором показания микроамперметра будут максимальны.
5. Подключить к гнездам установки осциллограф, произвести наблюдение формы сигнала фотодатчика и зарисовать его. Сравнить форму сигнала на экране осциллографа с графиком.
6. Вращая блок привода поляризатора с интервалом в  $3^\circ$  в пределах от  $0$  до  $360^\circ$ , произвести наблюдение изменения амплитуды и формы сигнала фотодатчика от угла поворота поляризатора.
7. По графику и результатам визуального наблюдения осциллограммы определить характер поляризации излучения лазера и положение главной плоскости поляризации его излучения.
8. Снизить частоту вращения привода блока анализатора до нуля и выключить его. П.п. 5–7 выполняются по указанию преподавателя.

## **Экспериментальная проверка закона Малюса**

1. Используя шкалу и данные, полученные при исследовании поляризации излучения лазера, установить блок вращения поляризатора  $\mathcal{P}$  в положение, при котором главная плоскость поляризации поляризатора совпадает с главной плоскостью поляризации излучения лазера.
2. Вращая вручную блок вращения анализатора  $\mathcal{A}$ , поставить его в положение, при котором главная плоскость поляризации анализатора будет совпадать с главной плоскостью поляризации поляризатора. При этом показания микроамперметра будут максимальными.
3. Вращая вручную блок вращения анализатора  $\mathcal{A}$  с интервалом не более  $30^\circ$  (по указанию преподавателя) в пределах от  $0$  до  $360^\circ$  относительно найденного положения, произвести измерения величины тока фотодатчика  $I_\phi$  от угла поворота анализатора. Результаты измерений занести в таблицу:

## Результаты измерений и вычислений

Экспериментальная зависимость $f_3(\alpha) = \frac{i}{i_{\max}}$													
$\alpha$ , град	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$I_{\phi}$ , мкА													
$i$ , мкА													
$i/i_{\max}$													
Теоретическая зависимость													
$\cos^2 \alpha$													

4. Для каждого значения угла  $\alpha$  вычислить силу исследуемого фототока  $i = I_{\phi} - (I_{\phi})_{\min}$ . Для этих же значений угла  $\alpha$  вычислить экспериментальную зависимость  $f_3(\alpha) = \frac{i}{i_{\max}}$  и теоретическую зависимость  $f_T(\alpha) = \cos^2 \alpha$ . Результаты вычислений занести в таблицу.

Построить графики указанных зависимостей в одной и той же системе координатных осей. Сравнить оба графика и сделать вывод по результатам проверки закона Малюса. Объяснить возможные причины несовпадения экспериментальной и теоретической зависимостей.

5. Выключить лазерный источник *I6* и отключить установку от сети.
6. Составить отчет по установленной форме.

### 2.5. Контрольные вопросы и упражнения

1. Чем отличается естественный свет от плоскополяризованного? В чем причина неполяризованности излучения источников естественного света?
2. Как устроены различные виды поляризаторов? Каков принцип их действия?
3. Объясните назначение и принцип работы элементов установки для проверки закона Малюса (см. рис. 2.3).
4. Выведите закон Малюса.
5. Луч естественного света проходит через систему из двух последовательно расположенных поляризаторов. Полярироиды вращаются вокруг оси, совпадающей с направлением луча, в противоположные стороны с угловой скоростью  $\omega$ . Какая доля света (по интенсивности) пройдет через полярироиды за один их оборот вокруг оси?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИМЕТРА

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить раздел «Вращение плоскости поляризации света» [1, с. 365–366], [2, кн. 4, с. 213–215], а также теоретическую справку к работе.

#### 3.1. Цель работы

1. Изучить явление вращения плоскости поляризации света в оптически активных средах.
2. Определить концентрацию сахара в водном растворе с помощью поляриметра.

#### 3.2. Расчетные зависимости

При прохождении плоскополяризованного света через некоторые кристаллы (кварц, киноварь, иодат лития и др.), а также через растворы ряда аморфных веществ (сахара, камфоры, никотина и др.) его плоскость поляризации поворачивается на некоторый угол. Такие вещества называются *оптически активными*. Именно по вращению плоскости поляризации света оптическая активность и была впервые обнаружена на кристаллах кварца в 1811 г. французским физиком Д. Ф. Араго.

Объяснение этого явления было предложено французским физиком О. Ж. Френелем (1823 г.), показавшим, что оно в некоторой степени аналогично двойному лучепреломлению.

Действительно, любую плоскополяризованную световую волну можно разложить на две циркулярно-поляризованные волны с противоположным направлением вращения вектора  $\vec{E}$  напряженности электрического поля. Если допустить, что скорости распространения левополяризованной и правополяризованной составляющих падающей световой волны в кристалле отличаются друг от друга (правополяризованная волна распространяется

с большей скоростью, чем левополяризованная):  $V_{\text{лев}} \neq V_{\text{пр}}$ , то при прохождении ими расстояния  $l$  плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  результирующей волны (рис. 3.1) повернется на угол:

$$\varphi = \frac{\varphi_{\text{пр}} - \varphi_{\text{лев}}}{2}.$$

Таким образом, из векторной диаграммы (см. рис. 3.1) следует, что угол поворота  $\varphi$  плоскости поляризации световой волны в данной среде равен полуразности фаз ее право- и левополяризованных составляющих, набегавшей на пути  $l$ . Обозначив частоту света через  $\omega$  и принимая во внимание, что  $V_{\text{пр}} = c/n_{\text{пр}}$ , а  $V_{\text{лев}} = c/n_{\text{лев}}$ , получаем:

$$\varphi = \frac{\omega}{2c}(n_{\text{лев}} - n_{\text{пр}})l = \frac{\pi l}{\lambda}(n_{\text{лев}} - n_{\text{пр}}),$$

где  $n_{\text{лев}}$  и  $n_{\text{пр}}$  – соответственно показатели преломления рассматриваемых составляющих, причем быстрой составляющей соответствует меньший показатель преломления и, наоборот, медленной составляющей – больший.

Недостатком теории Френеля является то, что она не способна объяснить, почему скорости право- и левополяризованных составляющих, на которые разлагается плоскополяризованный свет, отличаются друг от друга.

Ответ на этот вопрос можно дать лишь с позиций молекулярной теории, развитой М. Борном (1915 г.), допустив асимметричное строение молекул оптически активного вещества (отсутствие центра симметрии и плоскостей симметрии). Простейшей моделью такой зеркально асимметричной молекулы является отрезок спирали. Подобную форму имеют многие органические молекулы.

Пусть на такую молекулу, диаметр которой равен  $D$ , в направлении  $X$  падает свет, поляризованный вдоль оси  $OY$  (рис. 3.2).

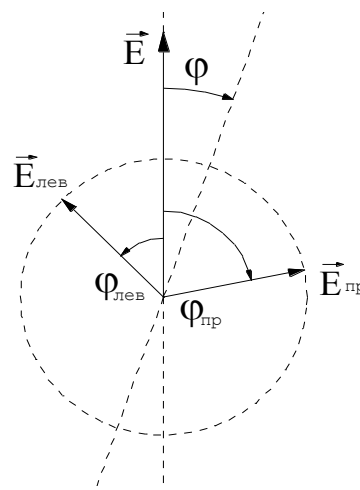


Рис. 3.1. Графическое определение угла поворота плоскости поляризации света

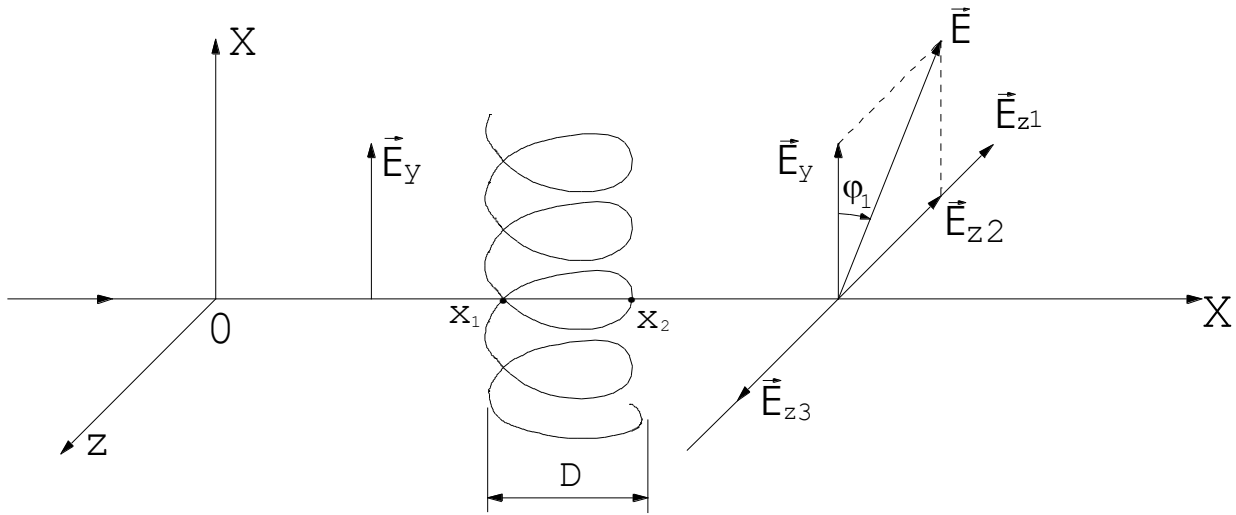


Рис. 3.2. К объяснению вращения плоскости поляризации света на спиральных молекулах

Электрическое поле падающей световой волны вызовет вынужденные колебания валентных электронов молекулы по виткам спирали, которые будут в виде вторичных волн распространяться, главным образом, вдоль оси  $OX$ . Поскольку электромагнитные волны поперечны, до некоторой произвольной точки  $X$  на этой оси дойдут лишь колебания, имеющие  $Y$ - и  $Z$ -компоненты. Причем, из точки  $X_2$  на правой стороне, в которых колебания электронов противофазны, вторичные волны дойдут до точки  $x$  с некоторой дополнительной к  $\pi$  разностью фаз  $\frac{\omega}{V}D$ . Соответствующие компоненты  $\vec{E}_{z1}$  и  $\vec{E}_{z2}$  напряженности электрического поля не смогут компенсировать друг друга, что означает появление за спиралью составляющей света, поляризованной вдоль оси  $OZ$  наряду с уже имеющейся составляющей, поляризованной по оси  $OY$ . В результате произойдет поворот плоскости поляризации света на небольшой угол  $\phi_1$  относительно первоначального положения.

Чем больше таких молекул пройдет свет, тем на больший угол повернется его плоскость поляризации. При прохождении в кристалле расстояния  $l$  угол поворота

$$\phi = \alpha l, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – постоянная вращения данного вещества, причем  $\alpha \sim 1/\lambda^2$  т.е. сильно зависит от длины волны подающего на кристалл света. (Так, для кварцевой пластинки толщиной  $l = 1$  мм,  $\phi_{\text{желт}} \approx 20^\circ$ , а  $\phi_{\text{фиол}} \approx 50^\circ$ ).

Если свет проходит через раствор оптически активного вещества, то формула (3.1) принимает вид

$$\varphi = [\alpha]Cl, \quad (3.2)$$

где  $C$  – концентрация оптически активного вещества в растворе;  $[\alpha]$  – его удельная постоянная вращения, т. е. угол поворота плоскости поляризации света, приходящийся на единицу концентрации вещества и единицу длины пути света в растворе. Как и  $\alpha$ ,  $[\alpha] \sim 1/\lambda^2$ .

### 3.3. Описание установки

На рис. 3.3. изображена оптическая схема поляриметра – прибора для определения концентрации оптически активного вещества в растворе по углу поворота в нем плоскости поляризации света.

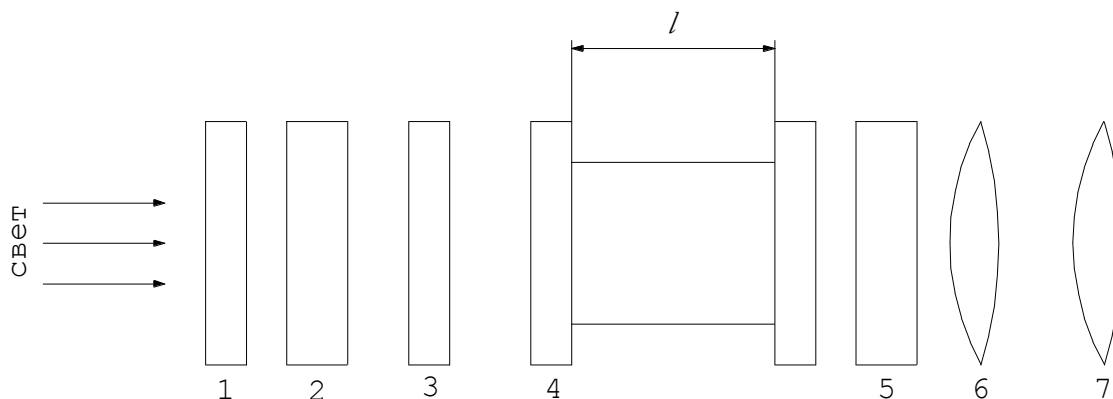


Рис. 3.3. Оптическая схема поляриметра:

1 – светофильтр; 2 – поляризатор; 3 – кварцевая пластинка; 4 – трубка с раствором оптически активного вещества; 5 – анализатор; 6 – объектив; 7 – окуляр

Поляризационное устройство состоит из поляризатора 2 (поляроидной пленки, заклеенной между двумя защитными стеклами), оранжевого светофильтра 1, кварцевой пластинки 3, занимающей половину поля зрения.

В поляриметре применен принцип уравнивания яркостей разделенного на две части поля зрения. Разделение поля зрения на две части осуществлено введением в оптическую систему прибора кварцевой пластинки, которая занимает половину поля зрения. Уравнивание яркостей частей поля зрения происходит вблизи полного затемнения поля, что соответствует почти полному скрещиванию поляризатора и анализатора ( $85-86^\circ$ ). Угол между направлением плоскости поляризации поляризатора и оптической осью кварцевой пластинки составляет  $4-5^\circ$ . Свет от матовой электрической

лампы или дневной свет с помощью зеркала прибора направляется в узел поляризатора. Пройдя оранжевый светофильтр 1 и поляризатор 2, свет одной половиной пучка проходит через кварцевую пластинку 3, защитное стекло и анализатор 5, а другой половиной пучка – только через защитное стекло и анализатор. Уравнивание яркостей частей поля зрения производится путем вращения анализатора. Если между анализатором и поляризатором ввести трубку 4 с оптически активным раствором или жидкостью, то равенство яркостей частей поля зрения нарушается. Вид поля зрения прибора приведен на рис. 3.4.

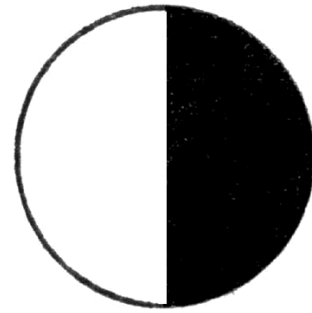


Рис. 3.4. Вид поля зрения прибора

Равенство яркостей может быть восстановлено поворотом анализатора на угол, равный углу поворота плоскости поляризации жидкостью. Следовательно, разностью двух отсчетов, соответствующих равенству яркостей частей поля с оптически активной жидкостью и без нее, определяется угол вращения плоскости поляризации. По углу вращения плоскости поляризации возможно определение концентрации вещества. Для большинства оптически активных веществ удельное вращение мало зависит от концентрации, и угол вращения пропорционален концентрации, то есть

$$\varphi = [\alpha]lC,$$

где  $\varphi$  – угол вращения плоскости поляризации, в градусах;  $[\alpha]$  – удельное вращение измеряемого оптически активного вещества для длины волны 589 нм и температуры 20 °С;  $l$  – длина трубки, см;  $C$  – концентрация, г/см<sup>3</sup>.

Зная угол вращения плоскости поляризации в градусах, можно определить концентрацию вещества, г/см<sup>3</sup>:

$$C = \frac{\varphi}{[\alpha]l}. \quad (3.3)$$

**Примечание.** При температуре окружающего воздуха, отличной от 20 °С, возможно увеличение погрешности измерения из-за зависимости удельного вращение оптически активного вещества от температуры. В этом случае необходимо результат измерения привести к температуре 20 °С, вводя температурную поправку. Эта поправка различна для различных веществ и может быть определена экспериментально или взята из справочной литературы.

Внешний вид портативного поляриметра П-161М представлен на рис. 3.5.

Головка анализатора 3 состоит из зрительной трубки, неподвижного лимба с градусной шкалой и совместно вращающихся частей: анализатора,

нониуса и отсчетной лупы 5. Головка анализатора с поляризационным устройством соединены соединительной трубкой 2.

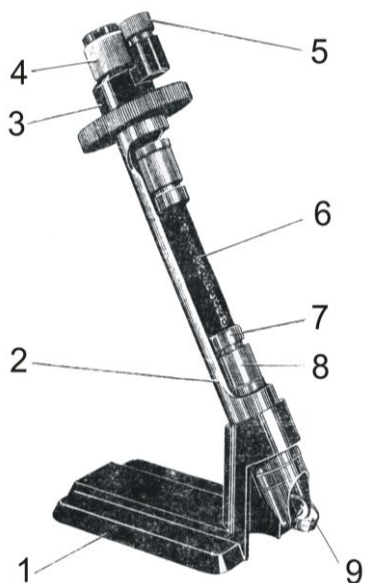


Рис. 3.5. Конструкция поляриметра П-161М:

1 – кронштейн; 2 – соединительная трубка; 3 – головка анализатора; 4 – оправка окуляра; 5 – отсчетная лупа; 6 – трубка для растворов; 7 – втулка; 8 – раковина; 9 – зеркало

В разрез соединительной трубки устанавливается трубка для растворов 6, имеющая длину стеклянной трубки 95,04 мм. На концах стеклянной трубки загипсованы металлические втулки 7, на которые навинчиваются раковины 8, прижимающие покровные стекла. Между раковинной и покровным стеклом помещена резиновая прокладка, предохраняющая покровное стекло от возникновения в нем напряжений при его закреплении. На соединительной трубке крепится зеркало 9 в оправе.

Анализатор 3 изготовлен из поляроидной пленки, заклеенной между двумя защитными стеклами, и вклеен во втулку 7.

Зрительная трубка служит для наблюдения двойного поля зрения и состоит из объектива и окуляра. Вращением оправы окуляра 4 производится установка окуляра по глазу на резкость изображения линий раздела поля зрения.

На неподвижном лимбе (рис. 3.6) вправо и влево от нуля нанесено 20 делений.

Цена деления лимба – 1 градус. В плоскости лимба на подвижной втулке имеются два нониуса – левый и правый. Каждый нониус разделен на 10 делений. Минимальное значение величины отсчета по нониусу – 0,1 градуса.



Рис. 3.6. Лимб и нониус

### 3.4. Порядок выполнения работы

В данной работе с помощью поляриметра измеряется концентрация сахара в водных растворах, хотя установка позволяет исследовать растворы и других оптически активных веществ.

Получив допуск к работе, заполнить табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные

№ п/п	Физическая величина		Примечания
	Наименование	Значение	
1	Удельная постоянная вращения сахара, $[\alpha]$	65,5 (град·см <sup>2</sup> )/г	При использовании другого вещества задается отдельно
2	Длина трубки, $l$		Измеряется линейкой
3	Число измерений, $n$		Задается преподавателем
4	Доверительная вероятность, $\alpha$		Задается преподавателем
5	Коэффициент Стьюдента, $t_{pn}$		Находится из справочных таблиц

1. В соединительную трубку прибора поместить трубку для растворов. Дневной свет или свет от матовой электрической лампочки мощностью не менее 40 Вт направить в прибор с помощью зеркала. Через окуляр зрительной трубки прибора наблюдать поле зрения. Располагать прибор необходимо на расстоянии 10–15 см от электрической лампы.

Путем вращения зеркала и перемещения осветителя или самого прибора добиться максимальной и равномерной освещенности.

Перемещением окуляра зрительной трубки добиться резкого изображения линии раздела поля зрения. Вращением анализатора можно уравнивать яркости частей поля при больших и меньших яркостях, но измерения следует производить только при чувствительном положении анализатора, которое характеризуется тем, что части поля уравнены при минимальных яркостях; незначительное вращение анализатора вызывает резкое нарушение равенства яркостей различных частей поля.

При исследовании оптически активных веществ, которые вращают плоскости поляризации на  $10^\circ$  и меньше, использовать обычную матовую лампу накаливания или дневной свет.

Если оптически активное вещество вращает плоскость поляризации больше чем на  $10^\circ$ , то необходимо пользоваться монохроматическим источником света – натриевой лампой ДНаС-18, так как появляющаяся окраска полей затрудняет установку на равенство яркостей частей поля зрения и приводит в связи с этим к существенным ошибкам.

2. Нулевой отсчет определить без трубки для растворов или с трубкой, наполненной дистиллированной водой. Вращением оправы окуляра установить окуляр по глазу на резкое изображение линии раздела поля зрения.

После этого вращением кольца поворачивать анализатор и добиться равенства яркостей частей поля зрения (в чувствительном положении).

При этом в поле зрения не должно наблюдаться окрашивание одной части поля относительно другой и не должно быть заметно резкое выделение стороны кварцевой пластинки. Если в поле зрения наблюдается окрашивание, то необходимо немного отжать покровные стекла трубки (если установка нуля происходит с трубкой), так как окрашивание поля зрения в данном случае получается за счет возникших натяжений в покровных стеклах трубки. Резкое выделение стороны кварцевой пластинки может происходить от неправильной установки зеркала. Установку на равномерную яркость частей поля зрения повторить пять раз. Каждый раз брать отсчеты по нониусу. Средняя величина из пяти отсчетов является нулевым отсчетом прибора.

Если нулевой штрих нониуса при установке на равенство яркостей частей поля зрения оказался относительно нулевого штриха лимба смещенным по часовой стрелке, то нулевому отсчету приписывается знак «+», если против часовой стрелки – знак «-». Нулевой отсчет следует определять отдельно для дневного света, электрической лампочки накаливания и монохроматического света (натриевой лампы).

3. Перед началом измерений трубки для растворов необходимо тщательно прочистить от всяких загрязнений. С этой целью через трубку протолкнуть пробку из фильтровальной бумаги, пропитанную спиртом или бензином, а покровные стекла протереть салфеткой, смоченной в спирте или бензине. После прочистки на один конец трубки наложить покровное стекло, резиновую прокладку, навинтить раковину, а затем трубку наполнить исследуемой жидкостью или раствором.



Заполнение трубки раствором ведется до тех пор, пока на верхнем конце трубки не появится выпуклый мениск. Он отходит в сторону при надвигании на него покровного стекла. Затем на покровное стекло накладывается резиновая прокладка и наворачивается раковина. После заполнения трубки исследуемой жидкостью покровные стекла с наружной стороны должны быть тщательно прочищены, а трубка насухо протерта салфеткой. В трубке не должно быть воздушных пузырей. Во избежание появления напряжений в покровных стеклах, влияющих на правильность отсчета, раковины нельзя заворачивать туго. Столь же недопустимы остаточные напряжения в самом стекле покровных стекол, поэтому их изготавливают из хорошего оптического стекла. Клинь покровных стекол не должен превышать 5'.

4. Оптически активные жидкости, которые подлежат исследованию, должны быть прозрачными, не иметь взвешенных частиц. Если в жидкости имеется несколько оптически активных веществ, то это необходимо учитывать при измерении.

Для определения угла вращения плоскости поляризации трубку с испытуемым раствором или жидкостью поместить в соединительную трубку прибора, затем установить окуляр по глазу на резкое изображение разделяющей линии поля зрения.

Поворотом анализатора установить равенство яркостей частей поля зрения и взять отсчет в следующем порядке:

1) посмотреть, на сколько полных градусов повернут нуль нониуса по отношению к лимбу;

2) подсчитать число делений от нуля нониуса до штриха нониуса, совпадающего с градусным штрихом лимба, и умножить полученное число делений на  $0,1^\circ$ ;

3) к числу градусов, взятых по лимбу, прибавить отсчет по нониусу.

**Пример.** При определении нулевого положения и пустой трубке для растворов прибор показывал  $+0,3^\circ$ , а после ввода наполненной трубки –  $+3,3^\circ$ .

$$+3,3^\circ - (+0,3^\circ) = +3,0^\circ.$$

Разность отсчетов между конечной и начальной установками равна углу вращения плоскости поляризации испытуемой жидкости.

5. Прodelать измерения угла  $\varphi$  количество раз, указанное преподавателем, после каждого раза сбивая настройку прибора и прodelывая эту операцию заново. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

**Результаты измерения концентрации \_\_\_\_\_ в растворе**  
(указать вещество)

№ п/п	$\varphi$ , град	$\Delta\varphi$ , град	$\varepsilon_{\varphi}$ , %	$\varepsilon_{\alpha}$ , %	$\varepsilon_e$ , %	$\bar{C}$	$\delta C$ , г/см <sup>3</sup>	$\bar{C} \pm \delta C$ , г/см <sup>3</sup>
1								
2								
3								
...								
Ср.								

Вычислить по формуле (3.3) концентрацию оптически активного вещества в растворе и найти погрешность измерений.

6. Составить отчет по работе согласно установленной форме.

### 3.5. Контрольные вопросы и упражнения

1. Сформулируйте основные положения теории оптической активности, разработанной Френелем. В чем ее недостаток?

2. Объясните вращение плоскости поляризации света с точки зрения молекулярной теории Борна.

3. Опишите устройство поляриметра, назначение его основных элементов и принцип действия прибора в целом.

4. Некоторые оптически активные вещества обладают циркулярным дихроизмом – избирательным поглощением лево- или, наоборот, правополяризованного по кругу света. На Ваш взгляд, где может быть использовано это явление?

5. Будет ли наблюдаться оптическая активность в кристалле кварца, если свет падает перпендикулярно его оптической оси?

6. Какой концентрации нужно взять сахарный раствор, чтобы получить поворот плоскости поляризации света на тот же угол, что и в кварцевой пластинке толщиной 10 мм? Длину трубки с раствором принять равной 20 см.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить раздел «Дифракция света» [1, с. 332–341], [2, кн. 4, 134–173], а также теоретическую справку к работе.

#### 4.1. Цель работы

1. Изучить дифракции света на щели и дифракционной решетке.
2. Ознакомиться с графическим методом расчета интенсивности дифрагированного света.
3. Определить длину волны монохроматического света с помощью амплитудной дифракционной решетки.

#### 4.2. Расчетные зависимости

Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально на длинную узкую щель в непрозрачной пластине (рис. 4.1, *a*). Вследствие дифракции за щелью появляются лучи самого различного направления, в том числе и такие, которые заходят в область геометрической тени. Линза, установленная напротив щели, собирает любую совокупность параллельных лучей в дифракционные полосы на экране, расположенном в ее фокальной плоскости.

Для отыскания распределения интенсивности дифрагированного света на экране воспользуемся методом векторного представления колебаний на плоскости (рис. 4.1, *б*).

Как видно из рис. 4.1, *a*, разность хода лучей, дифрагированных от краев щели на угол  $\varphi$

$$\Delta = a \sin \varphi,$$

где  $a$  – ширина щели, а разность фаз соответствующих волн.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \varphi, \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны в рассматриваемой среде.

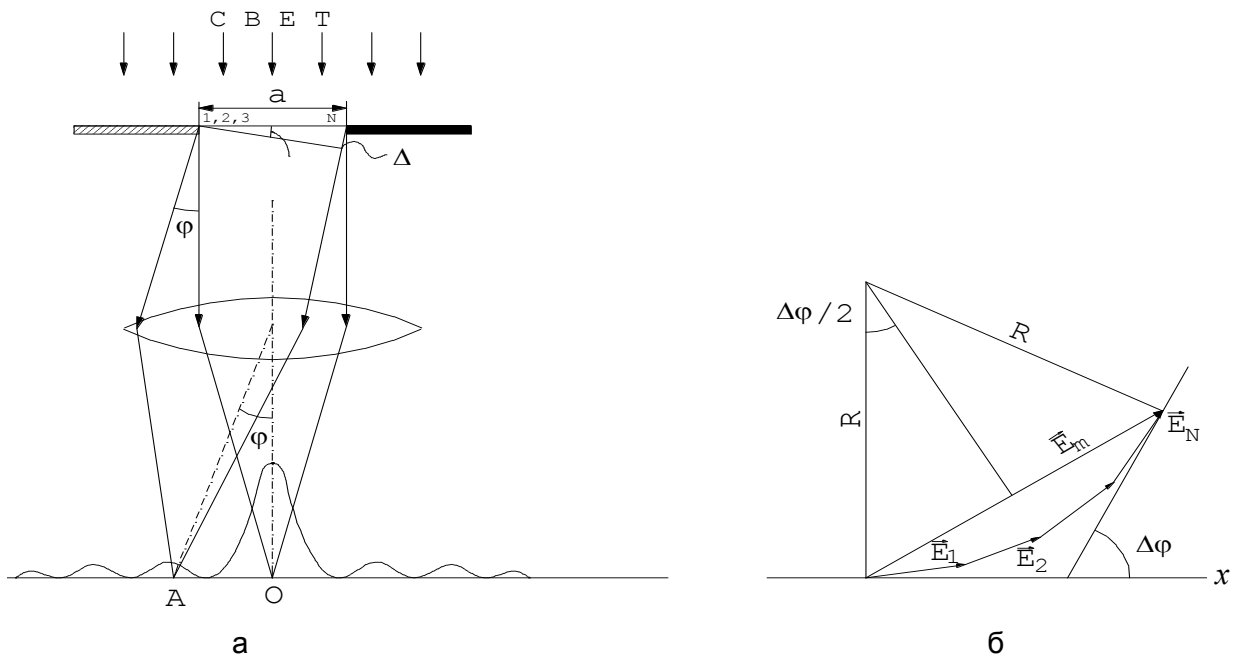


Рис. 4.1. Дифракция Фраунгофера плоской световой волны на щели (а) и векторная диаграмма (б), иллюстрирующая нахождение амплитуды дифрагированного света

Разобьем фронт волны в пределах щели на  $N$  одинаковых узких зон и сложим векторы, характеризующие колебания напряженности электрического поля световых волн, приходящих из этих зон в точку  $A$  наблюдения на экране. Амплитуды указанных волн, равные длине векторов, примерно одинаковы ( $E_1 \approx E_2 \approx E_3 \approx \dots E_n$ ), а их фаза, по мере увеличения номера зоны, постепенно увеличивается, так что складываемые векторы образуют ломаную линию, вписанную в дугу окружности некоторого радиуса  $R$ . Причем сдвиг фаз волн, приходящих в точку  $A$  от левого и правого краев щели, определяемый выражением (4.1), изобразится на векторной диаграмме углом  $\Delta\varphi$  между выбранным направлением отсчета  $X$  и касательной к окружности, проведенной через конец последнего вектора  $\vec{E}_N$ . Из построения видно, что амплитуда результирующей световой волны  $E_m$ , дифрагированной на щели под углом  $\varphi$  к нормали, равна

$$E_m = 2R \sin \frac{\Delta\varphi}{2}.$$

Радиус окружности  $R$  можно найти, зная амплитуду  $E_0$  недифрагированного света, которая на векторной диаграмме обозначается длиной дуги, стягиваемой вектором  $\vec{E}_m$ . Действительно, если ее распрямить, то полученный вектор будет представлять собой амплитуду результирующих колебаний,

создаваемых световыми волнами, приходящими в точку наблюдения из всех  $N$  зон без всякого сдвига по фазе в точку  $O$ , то есть без дифракции (см. рис.

4.1, *a*). Так как  $R = \frac{E_0}{\Delta\varphi}$ , то амплитуда дифрагированного на угол  $\varphi$  света

$$E_m = E_0 \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2}}.$$

Поскольку интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды ( $I \sim E_m^2; I_0 \sim E_0^2$ ), то ее распределение на экране имеет вид:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2}} \right)^2. \quad (4.2)$$

Как следует из (4.2), минимумы интенсивности дифрагированного света наблюдаются при  $\frac{\Delta\varphi}{2} = m\pi$  ( $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ ). С учетом (4.1) это дает условие минимумов дифракции света на щели:

$$a \sin \varphi = m\lambda. \quad (4.3)$$

Рассмотрим теперь дифракцию света на системе из  $N$  одинаковых щелей шириной  $a$  каждая, прорезанных в непрозрачной пластине с периодом  $d$  друг относительно друга (рис. 4.2, *a*). Такое устройство называется амплитудной дифракционной решеткой.

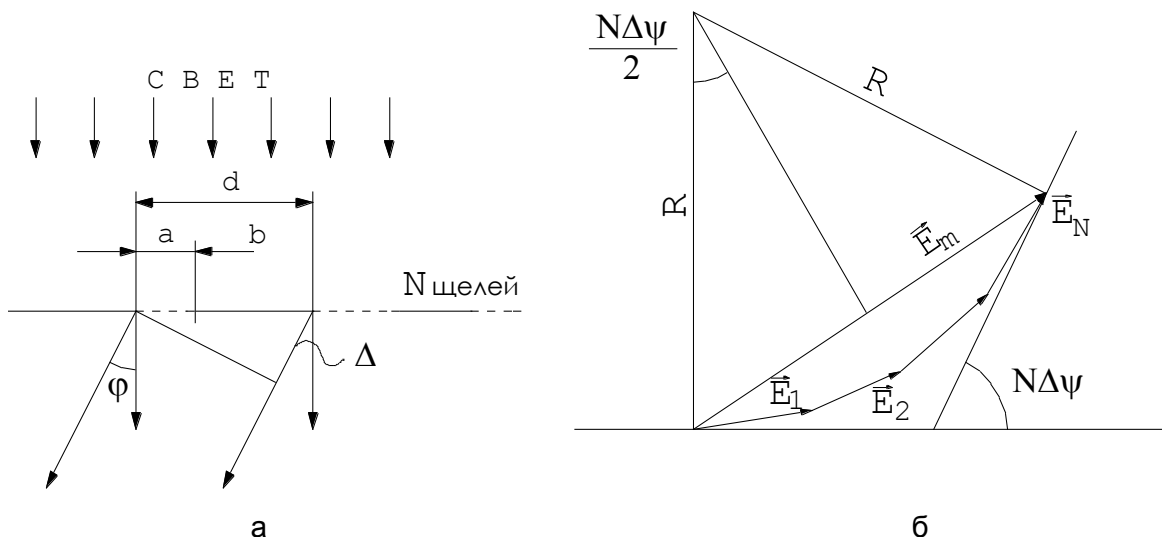


Рис. 4.2. Дифракция плоской световой волны на амплитудной дифракционной решетке (а) и векторная диаграмма (б), описывающая это явление

Разность хода лучей, дифрагированных от краев соседних щелей на угол  $\varphi$ ,

$$\Delta = d \sin \varphi,$$

а разность фаз соответствующих им волн

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi. \quad (4.4)$$

Сложим векторы, характеризующие колебания напряженности электрического поля световых волн, приходящих в некоторую точку экрана из всех  $N$  щелей, учитывая разность фаз (4.4) между ними (рис. 4.2, б). Амплитуда  $E_m$  дифрагированного на угол  $\varphi$  света в этом случае равна:

$$E_m = 2R \sin N \frac{\Delta\psi}{2},$$

а амплитуда света, дифрагированного только одной щелью ( $N = 1$ ),

$$E_{m_1} = 2R \sin \frac{\Delta\psi}{2}.$$

Исключая из двух последних уравнений  $R$ , с учетом соответствующего выражения для  $E_{m_1}$ , выведенного ранее, получим:

$$E_m = E_{m_1} \frac{\sin N \frac{\Delta\psi}{2}}{\sin \frac{\Delta\psi}{2}} = E_0 \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2}} \frac{\sin N \frac{\Delta\psi}{2}}{\sin \frac{\Delta\psi}{2}}.$$

Возведем данное выражение в квадрат и получим условие распределения интенсивности дифрагированного на решетке света в виде:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2}} \right)^2 \left( \frac{\sin N \frac{\Delta\psi}{2}}{\sin \frac{\Delta\psi}{2}} \right)^2, \quad (4.5)$$

где  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\psi$  описываются выражениями (4.1), (4.4).

График этого распределения представлен на рис. 4.3.

Анализ выражения (4.5) приводит к следующим выводам:

1. Первый множитель в круглых скобках описывает дифракцию света на каждой щели решетки в отдельности. Он приводит к пространственной модуляции дифракционной картины по интенсивности (пунктирная линия на рис. 4.3) и обуславливает наличие главных минимумов, описываемых условием (4.3).

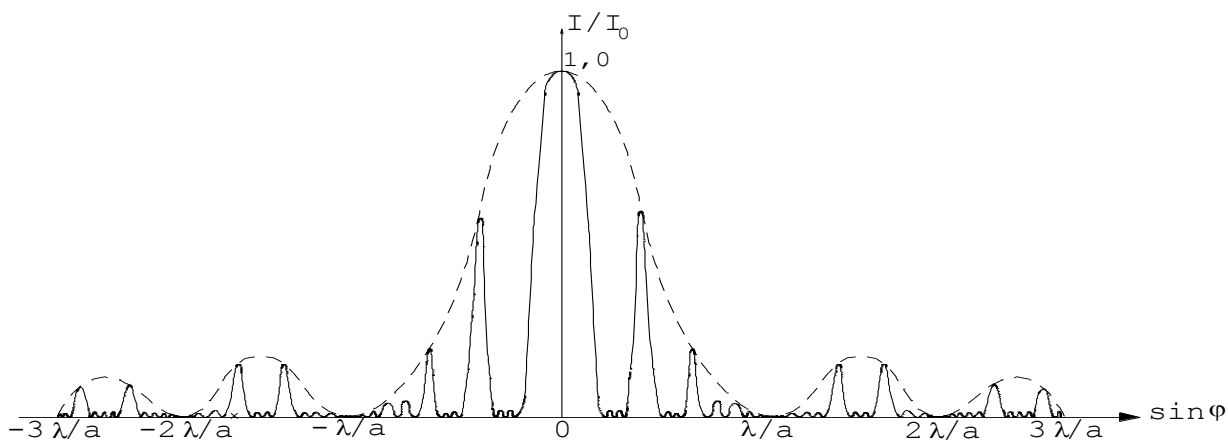


Рис. 4.3. Распределение интенсивности дифрагированного света на амплитудной дифракционной решетке, у которой  $N = 4$  и  $d/a = 3$

2. Второй множитель в круглых скобках учитывает вклад межщелевой интерференции света. При  $\Delta\psi/2 = n\pi$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) этот множитель достигает своего максимального значения  $N^2$ . С учетом (4.4) это дает условие так называемых главных максимумов дифракционной решетки:

$$d \sin \varphi = n\lambda. \quad (4.6)$$

Число главных максимумов ограничено и, как следует из (4.6), определяется условием

$$n \leq \frac{d}{\lambda}. \quad (4.7)$$

3. При  $N\Delta\psi/2 = p\pi$  (где  $p$  – любое целое число, кроме  $0, \pm N, \pm 2N, \dots$ ) второй множитель в (4.5) обращается в нуль. С учетом (4.4) это дает условие добавочных минимумов

$$d \sin \varphi = \frac{p}{N}\lambda. \quad (4.8)$$

Если  $p$  принимает запрещенные выше значения, то (4.8) сводится к условию (4.6) главных максимумов. Это означает, что между каждой парой главных максимумов будет  $(N - 1)$  добавочных минимумов и  $(N - 2)$  добавочных максимумов (см. рис. 4.3), интенсивность которых во много раз меньше интенсивности главных максимумов.

4. Если отношение периода решетки  $d$  к ширине щели  $a$  является целым числом:  $d/a = k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), то, как следует из (4.3) и (4.6), каждый  $k$ -й главный максимум пропадает – на его месте будет главный минимум.

### 4.3. Описание установки

#### Установка с использованием лампы накаливания

Лабораторная установка для измерения длины волны монохроматического света с помощью дифракционной решетки (рис. 4.4) состоит из оптической скамьи *1* в виде металлической оцифрованной линейки. К ее переднему торцу прикреплен держатель *2*, в который вкладывается дифракционная решетка. С другого торца на брусок надевается ползунок с вертикальным экраном *3*, который может перемещаться по всей длине бруска. На экран нанесены деления с сантиметровым интервалом, отмеченные цифрами вправо и влево от нуля. Над нулевым делением шкалы сделана прорезь, через которую проходит свет от осветительной лампы *4*, снабженной различными по цвету светофильтрами.

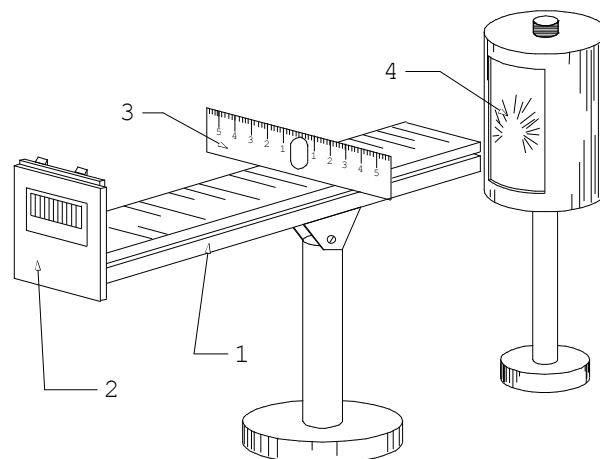


Рис. 4.4. Установка для измерения длины волны монохроматического света с помощью дифракционной решетки:

1 – оптическая скамья; 2 – держатель с дифракционной решеткой; 3 – экран с делениями; 4 – осветительная лампа со светофильтрами

Посередине бруска, снизу, прикреплена металлическая скоба, в которой шарнирно закреплена металлическая стойка, позволяющая устанавливать брусок под разными углами. Прибор закрепляется в подставке на такой высоте, чтобы горизонтально установленная рейка была на уровне глаз наблюдателя.

Если смотреть на освещенную монохроматическим светом щель через дифракционную решетку, то на экране наблюдаются главные дифракционные максимумы, представляющие собой изображения щели в разных порядках дифракционного спектра.



На рис. 4.5 изображены лучи, направленные из дифракционной решетки в главные максимумы на экране.

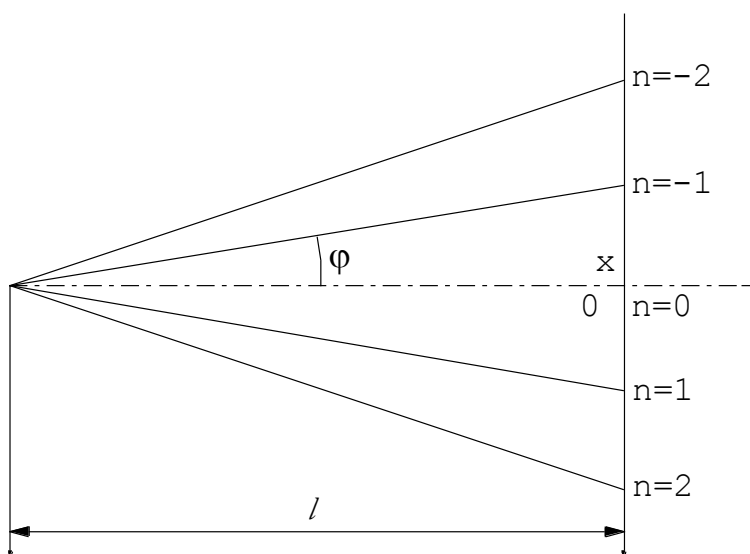


Рис. 4.5. Ход лучей, дифрагированных на дифракционной решетке в направлении главных максимумов

Так как угол  $\varphi$  мал, то

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{l}.$$

Сравнивая это выражение с (4.6), получаем для длины волны света следующее выражение:

$$\lambda = \frac{xd}{nl}, \quad (4.9)$$

где  $n$  – порядковый номер наблюдаемого главного максимума.

Так как соотношение между периодом решетки  $d$  и шириной щели  $a$  обычно бывает неизвестно и некоторые максимумы могут быть погашены, то, чтобы не ошибиться в значении  $n$ , на практике удобнее наблюдать первый порядок дифракции ( $n = 1$ ).

### Установка с использованием лазера

В данной лабораторной работе предусмотрена также возможность определения длины волны монохроматического лазерного излучения с помощью дифракционной решетки в проходящем свете. Для этих целей собрана установка, внешний вид которой представлен на рис. 4.6.

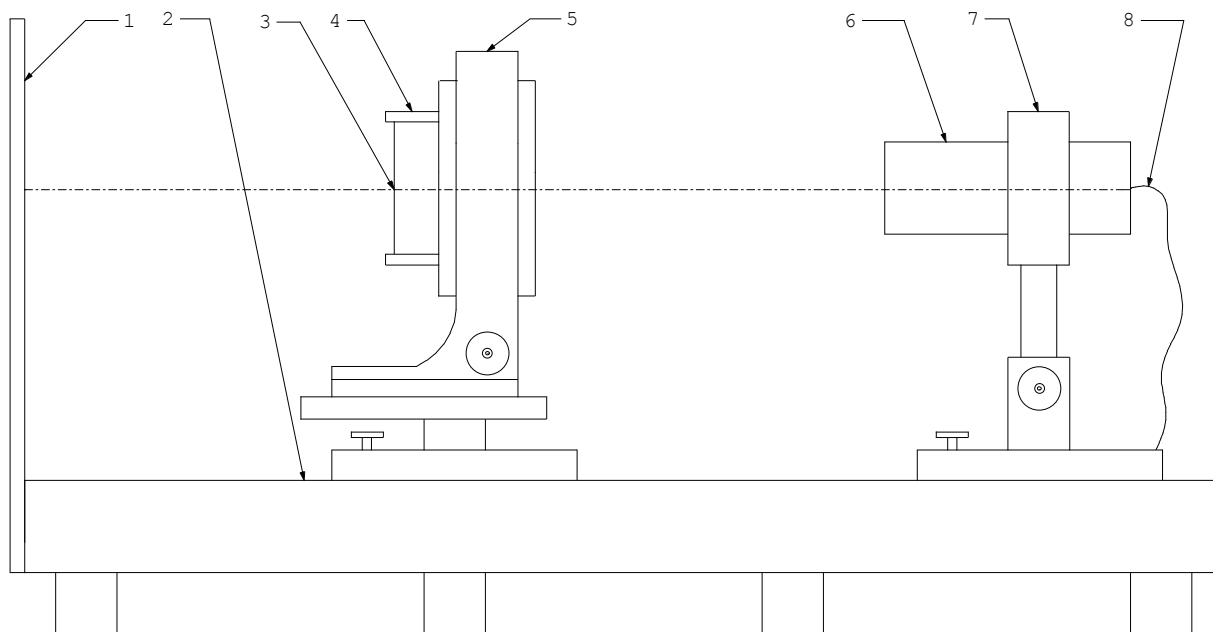


Рис. 4.6. Внешний вид лабораторной установки:

1 – экран; 2 – оптическая скамья; 3 – дифракционная решетка; 4 – держатель дифракционной решетки; 5 – гониометрический стол со шкалой; 6 – лазерный излучатель; 7 – держатель лазерного излучателя; 8 – соединительные провода питания лазерного излучателя

На оптической скамье 2 установлены держатель лазерного излучателя 7 с закрепленным в нем лазерным излучателем 6, гониометрический стол 5 с закрепленной на нем дифракционной решеткой 3. На торце оптической скамьи закреплен экран 1. На скамье вдоль одной из направляющих нанесена шкала длиной 2000 мм с ценой деления 1 мм для измерения перемещений устанавливаемых на ней оптических устройств.

Держатель лазерного излучателя может перемещаться по оптической скамье в продольной плоскости и фиксироваться относительно экрана и дифракционной решетки. Он позволяет перемещать закрепленный в нем лазерный излучатель в вертикальной и горизонтальной плоскости параллельно экрану.

Лазерный излучатель  $\lambda_{\max} = 630\text{--}680$  нм представляет собой бытовую лазерную указку (на основе полупроводникового излучающего лазерного диода), источником питания которой служит внешний источник постоянного тока.

Гониометрический стол перемещается и фиксируется на оптической скамье относительно экрана и лазерного излучателя в продольной плоскости. Кроме того, он поворачивается на угол  $\pm 40^\circ$  относительно продольной

оси скамьи, имеет шкалу с ценой деления  $1^\circ$ , позволяющую отсчитывать угол поворота стола. На столе с помощью держателя закреплена дифракционная решетка.

Дифракционная решетка имеет 100 штрихов на 1 мм и может работать как в проходящем, так и в отраженном свете.

Экран установлен на торце оптической скамьи, его размеры  $1000 \times 800$  мм. На экране закреплена миллиметровая бумага для обеспечения измерения координат максимумов излучения.

#### 4.4. Порядок выполнения работы

1. Получить допуск к работе и заполнить табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные

№ п/п	Физическая величина		Примечания
	Наименование	Значение	
1	Цвет светофильтра		Задается преподавателем
2	Число измерений, $N$		Задается преподавателем
3	Порядок дифракции, $n$		Задается преподавателем
4	Доверительная вероятность, $p$		Задается преподавателем
5	Коэффициент Стьюдента, $t_{pn}$		Находится из приложения
6	Период решетки, $d$		Указан на решетке

Установить дифракционную решетку в держателе так, чтобы ее штрихи были параллельны прорези в экране. Включить осветительную лампу и установить напротив нее светофильтр указанного преподавателем цвета (может быть использован монохроматический свет от лазера). Отрегулировать высоту поднятия стойки прибора и угол ее наклона таким образом, чтобы на экране получилась отчетливая дифракционная картина в виде расположенных симметрично относительно прорези нескольких главных максимумов (добавочные максимумы, ввиду их слабой интенсивности, глазом обычно не воспринимаются).

2. Измерить расстояние между дифракционной решеткой и экраном  $l$  и соответствующую ему координату  $n$ -го максимума (по указанию преподавателя)  $x$  относительно нуля отсчета (центра картины на экране). Данные

измерений занести в табл. 4.2. Измерения повторить  $N$  раз (по указанию преподавателя). По окончании работы выключить источник света.

3. Заполнить табл. 4.2, выполнив необходимые расчеты. Погрешности измерений вычислить упрощенным способом.

Таблица 4.2

**Результаты измерения длины волны**

\_\_\_\_\_ **с помощью дифракционной решетки**

(указать цвет)

№ п/п	$n$	$l$ , мм	$x$ , мм	$\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda$ , мкм	$S_{M\lambda}$ , мкм	$\delta\lambda$ , мкм	$\varepsilon_{\lambda}$ , %	$\bar{\lambda} \pm \delta\lambda$ , мкм
1									
2									
3									
...									
Ср.									

4. Составить отчет по лабораторной работе согласно установленной форме.

При использовании лабораторной установки с использованием лазера подготовка к работе и порядок выполнения задания имеют следующую последовательность.

1. Установить оптическую скамью на лабораторном столе строго горизонтально с помощью регулировочных опор.

2. Установить и закрепить в требуемом положении держатель с лазерным излучателем.

3. Подключить лазерный излучатель к блоку питания с помощью соединительных проводов, входящих в комплект установки, с соблюдением определенной полярности.

4. Подключить блок питания лазерного излучателя к сети.

5. Установить на оптической скамье и закрепить в требуемом положении гониометрический стол с дифракционной решеткой, плоскость решетки должна быть параллельна плоскости экрана.

6. Включить тумблер блока питания лазерного излучателя и убедиться в наличии излучения лазерного диода.

7. Перемещая держатель лазерного излучателя в горизонтальной и вертикальной плоскостях, добиться того, чтобы луч лазерного излучателя

проходил через центральную часть дифракционной решетки. На экране должны наблюдаться интерференционные максимумы в виде ярких точек, расположенных симметрично относительно продольной оси оптической скамьи.

8. Установить гониометрический стол с дифракционной решеткой на расстоянии 1500–1800 мм (по указанию преподавателя) от плоскости дифракционной решетки до экрана и закрепить его. Отсчет расстояния  $l$  производить по шкалам на оптической скамье. Результаты измерений занести в табл. 4.2.

9. Измерить расстояние  $x$  между центральным максимумом и максимумом  $n$ -го порядка (1, 2, 3, ... – по указанию преподавателя) по шкале на экране. Результаты измерений занести в табл. 4.2.

10. Переместить гониометрический стол в сторону экрана на 50 мм (или на другое, указанное преподавателем). Повторить измерения согласно п. 9.

11. Повторить измерения не менее 6 раз для других максимумов согласно пп. 9–10 (количество измерений – по указанию преподавателя).

12. Выключить блок питания и отключить его от сети.

13. Рассчитать длину волны излучения лазерного излучателя по формуле (4.9) для каждого измерения. Обработать результаты измерений по методу Стьюдента, записать значение длины волны излучения в виде доверительного интервала. Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

14. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

15. Составить отчет по лабораторной работе согласно установленной форме.

#### **4.5. Контрольные вопросы и упражнения**

1. В чем различие между дифракцией Френеля и дифракцией Фраунгофера? Как в данной работе обеспечивается режим наблюдения дифракции Фраунгофера?

2. В непрозрачной пластине прорезана щель шириной 10 мкм. Она освещается плоской монохроматической световой волной зеленого цвета ( $\lambda = 0,56$  мкм). Какова ширина центральной дифракционной полосы на экране, удаленном от отверстия на расстояние 3 м?

3. Дифракционная решетка, изготовленная фотолитографическим способом, содержит 10 щелей шириной по 1 мкм каждая на участке в 20 мкм. Решетка освещается светом с длиной волны 0,5 мкм. Изобразите (качественно) угловое распределение интенсивности дифрагированного света этой решетки.

4. На какой угол отклоняется свет, дифрагированный в последний наблюдаемый максимум, при использовании решетки из предыдущего упражнения?

5. Что Вы увидите, если посмотрите через дифракционную решетку на электрическую лампочку без светофильтра? Где и с какой целью применяются дифракционные решетки?

#### 4.6. Задания с элементами научного исследования

Задания выполняются по указанию преподавателя взамен п. 4.4.

1. Исследуйте дифракционную картину, возникающую при дифракции света на двух скрещенных одномерных решетках. Зарисуйте и объясните ее. Постарайтесь использовать решетки с различными периодами. Из полученных данных найдите длину волны света. Результаты работы оформите в виде отчета.

2. Используя в качестве источника света гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ , определите, как можно точнее, период дифракционной решетки. Работу рекомендуется выполнять на установке с использованием лазера. Результаты измерений представьте в виде отчета.

3. Теоретически и экспериментально исследуйте случай наклонного падения света на дифракционную решетку. Выведите формулу для распределения интенсивности дифрагированного света в зависимости от угла падения  $i$  и угла дифракции  $\varphi$ . Закрепите дифракционную решетку на оптической скамье под углом к направлению светового пучка и сопоставьте результаты наблюдения дифракционной картины с теоретически ожидаемым дифракционным спектром. Наблюдение необходимо производить в монохроматическом свете. Составьте отчет о проделанной работе.

4. Используя лабораторную установку (см. рис. 4.6), определите угловую дисперсию  $D = \frac{d\varphi}{d\lambda}$  дифракционной решетки в спектре  $n$ -го порядка

( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) для указанного преподавателем цвета световой волны. Сравните полученное значение с расчетным значением этой величины, воспользовавшись справочными данными для длины волны света. Методику работы согласуйте с преподавателем. По итогам работы подготовьте отчет.

Исследуйте дифракцию белого света на дифракционной решетке. Для этого решетку следует осветить электрической лампой накаливания без светофильтра. По спектру первого порядка оцените диапазон длин волн для красного, зеленого и синего цветов. Составьте отчет о проделанной работе.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ**

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить раздел «Тепловое излучение» [1, с. 367–374], [2, кн. 5, с. 9–35], а также теоретическую справку к работе.

#### **5.1. Цель работы**

1. Изучить равновесное излучение электромагнитных волн нагретым телом (нить накала электрической лампы).
2. Экспериментально проверить закон Стефана–Больцмана.
3. Рассчитать: коэффициент черноты; длину волны, при которой спектральная плотность энергетической светимости тела достигает максимума.

#### **5.2. Расчетные зависимости**

##### **Закон Кирхгофа**

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии, называется тепловым излучением. Тепловое излучение равновесно, если расход энергии тела на излучение компенсируется за счет подвода к нему такого же количества энергии. При этом температура тела сохраняется.

## Основные характеристики теплового излучения

1. Спектральная плотность энергетической светимости численно равна отношению энергии  $dW_{\text{изл}}$ , излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела в интервале частот от  $\omega$  до  $d\omega$ , к ширине этого интервала:

$$r_{\omega} = \frac{dW_{\text{изл}}}{d\omega}.$$

Единица измерения – Дж/м<sup>2</sup>.

2. Энергетическая светимость – энергия электромагнитных волн всевозможных частот (от 0 до  $\infty$ ), излучаемая за единицу времени с единицы площади поверхности тела:

$$R = \int_0^{\infty} dW_{\text{изл}} = \int_0^{\infty} r_{\omega} dW.$$

Единица измерения – Вт/м<sup>2</sup>.

3. Спектральная поглощательная способность показывает, какая доля энергии электромагнитных волн с частотами от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ , падающих на поверхность тела, поглощается им:

$$a_{\omega} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}}.$$

*Абсолютно черное тело* (АЧТ) – тело, способное поглощать при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты (спектральная поглощательная способность АЧТ для всех частот и температур равна 1).

Тело, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела, называется *серым телом*.

Часть падающей энергии отражается от поверхности тела:

$$dW_{\text{отр}} = dW_{\text{пад}} - dW_{\text{погл}} = dW_{\text{пад}} (1 - a_{\omega}).$$

Перечисленные характеристики являются функциями температуры:

$$r_{\omega} = r_{\omega T}, \quad R = R_T, \quad a_{\omega} = a_{\omega T}.$$

**Закон Кирхгофа.** При тепловом равновесии отношение спектральной плотности энергетической светимости любого тела к его спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела и для всех тел является универсальной функцией частоты (длины волны) и его температуры:



$$\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}} = f(\omega, T). \quad (5.1)$$

Температура тела остается постоянной при выполнении теплового баланса  $dW_{\text{погл}} = dW_{\text{изл}}$ , поэтому тело, интенсивно испускающее энергию ( $r_{\omega}$  велико), должно интенсивно ее поглощать ( $a_{\omega}$  велико).

По физическому смыслу функция

$$f(\omega, T)d\omega = dW_{\text{пад}} = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \quad (5.2)$$

– энергия равновесного излучения с частотами от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ , падающая за единицу времени на единицу площади поверхности каждого из тел термодинамически равновесной системы, где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

### **Закон Стефана–Больцмана. Закон смещения Вина**

По определению  $a_{\omega}$  не может быть больше единицы. Для тела, полностью поглощающего при любых температурах все падающее на него излучение,  $a_{\omega} = 1$  (абсолютно черное тело). Серым является тело, спектральная поглощающая способность которого зависит только от температуры и не зависит от частоты (длины волны) излучения. Если спектральная поглощающая способность тела зависит и от частоты электромагнитного излучения, то для таких (не серых) тел введено понятие средней спектральной поглощательной способности при данной температуре – коэффициента черноты  $\varepsilon$  ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ).

**Закон Стефана–Больцмана.** Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R^* = \sigma T^4, \quad (5.3)$$

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

*Пояснение к (5.3)*

Для абсолютно черного тела в условиях термодинамического равновесия:

$$dW_{\text{пад}} = dW_{\text{погл}} = dW_{\text{изл}}; \quad r_{\omega}^* = f(\omega, T).$$

Таким образом, функция  $f(\omega, T)$  определяет спектральную плотность энергетической светимости абсолютно черного тела. Интегрирование выражения (5.2) в пределах от 0 до  $\infty$  приводит к зависимости (5.3). Энергетическая светимость серого тела:

$$R = \varepsilon \sigma T^4. \quad (5.4)$$

Однако, в этом случае коэффициент черноты зависит от материала тела, состояния его поверхности и температуры.

*Пояснение к (5.4)*

В случае не серого тела из закона Кирхгофа следует, что

$$r_\omega = \varepsilon f(\omega, T),$$

поэтому

$$R = \int_0^\infty r_\omega d\omega = \varepsilon \int_0^\infty f(\omega, T) d\omega = \varepsilon \sigma T^4.$$

В экспериментальных исследованиях часто удобнее пользоваться функцией длины волны  $r_\lambda$ . Из выражений  $r_\omega d\omega = r_\lambda d\lambda$ ,  $\lambda = 2\pi c/\omega$  следует  $r_\lambda = (2\pi c/\lambda^2)r_\omega$ . Зависимости  $r_\lambda^*$  –  $\lambda$  представлены на рис. 5.1.

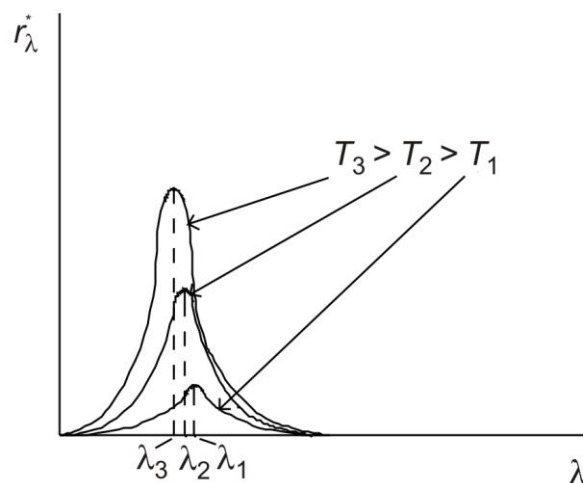


Рис. 5.1. Зависимость спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при нескольких постоянных значениях температуры

На основании выражения (5.2) можно найти также частоту (длину волны), при которой излучается наибольшая энергия. Решение уравнения  $df(\omega, T)/d\omega = 0$  дает:

$$\omega_{\max} = 2,8 \frac{kT}{\hbar} \text{ или } \lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (5.5)$$

где  $\omega_{\max}$  ( $\lambda_{\max}$ ) определяет частоту (длину волны), при которой спектр излучения имеет максимум;  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  мК – постоянная величина.

Соотношения (5.5) носят название закона смещения Вина. Если взять, например, значения температуры 2000, 3000 и 4000 К, то длины волн, при которых  $r_{\lambda}^*$  имеет максимум (см. рис. 5.1), равны, соответственно, 1,45; 0,967; 0,725 мкм.

### 5.3. Описание установки

Относительное распределение энергии в спектре излучения ламп накаливания примерно такое же, как и у абсолютно черного тела, особенно в видимой области спектра. Нить накала лампы изготовлена из вольфрама в виде тонкой спирали. Однако вольфрам, температура плавления которого  $\sim 3700$  К, выносит длительное нагревание лишь до температуры около  $\sim 2700$  К вследствие потерь на испарение. Это нормальная рабочая температура газонаполненных вольфрамовых ламп накаливания. Добавление инертного газа (до давления  $\sim 5 \cdot 10^5$  Па) уменьшает распыление нити и увеличивает срок службы лампы.

На рис. 5.2 приведена электрическая схема установки для исследования характеристик теплового излучения лампы накаливания.

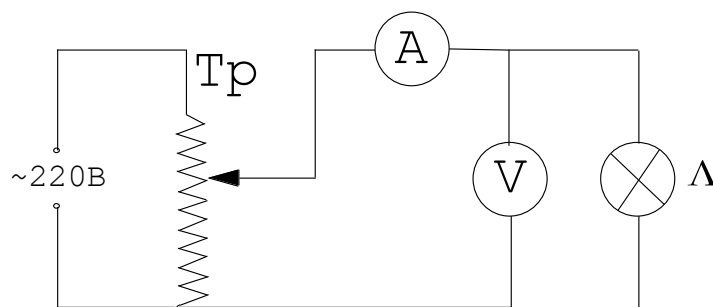


Рис. 5.2. Электрическая схема установки:

Тр – автотрансформатор; А – амперметр; V – вольтметр; Л – лампа накаливания

Подводимая к спирали электрическая мощность  $P$  расходуется на выделение тепла. В условиях стационарности процесса количество тепла, выделяемого током в спирали, равно количеству тепла, отдаваемого за то же время в окружающую среду.

При низких температурах основные тепловые потери связаны с конвекцией и теплопроводностью. Эти потери, однако, растут как первая, а не как четвертая степень температуры. Поэтому при достаточно высоких температурах основную роль начинают играть именно потери на излучение. При этом наряду с мощностью, излучаемой спиралью, необходимо учитывать также мощность, получаемую от окружающих тел. Тем самым мощность, затрачиваемая на излучение, уменьшается до величины

$$(\varepsilon\sigma T^4 - \varepsilon_0\sigma T_0^4)S,$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  – коэффициенты черноты вольфрамовой спирали и окружающей среды, а  $T$  и  $T_0$  – температуры черноты вольфрамовой спирали и окружающей среды соответственно;  $S$  – площадь спирали.

Поглощение электромагнитного излучения при  $T \gg T_0$  невелико и составляет

$$P \approx \varepsilon\sigma T^4 S. \quad (5.6)$$

Следовательно, если построить график зависимости мощности  $P$ , выделяемой током в нити накала, от аргумента  $T^4$ , то, начиная с некоторых температур, зависимость должна быть линейной. Экспериментальное подтверждение линейной зависимости  $P = P(T^4)$  при высоких температурах указывает на справедливость закона Стефана–Больцмана.

Кроме того, по угловому коэффициенту (тангенс угла наклона зависимости  $P = P(T^4)$ ) можно определить среднее в исследуемом интервале температур значение коэффициента черноты нити накала:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dP}{d(T^4)} \cong \varepsilon\sigma S,$$

откуда 
$$\varepsilon = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\sigma S}. \quad (5.7)$$

Для построения зависимости  $P = P(T^4)$  необходимы данные по мощности  $P$ , выделяемой током в нити накала, и по температуре  $T$  этой нити:

$$P = UI \cos\varphi \approx UI, \quad (5.8)$$

где  $U$  и  $I$  определяются по показаниям вольтметра и амперметра соответственно (см. рис. 5.2);  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности, приближенно равный единице вследствие малой индуктивности и межвитковой емкости вольфрамовой спирали.

В свою очередь, определение  $T$  основано на температурной зависимости сопротивления металлических проводников:

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $R, R_0$  – сопротивления проводника при температурах  $t$  и  $0$  °С, соответственно;  $t$  – температура, °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Из последнего выражения

$$T = 273,2 + t = 273,2 + \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right). \quad (5.9)$$

Величина сопротивления нити накала находится из экспериментальных данных по току и напряжению:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (5.10)$$

#### 5.4. Порядок выполнения работы

1. Исследовать зависимость силы тока в лампе от приложенного напряжения  $I = I(U)$ . Напряжение изменять в пределах от 50 до 220 В с шагом не более 10 В поворотом рукоятки автотрансформатора (см. рис. 5.2). Для каждого значения напряжения измерять соответствующее значение силы тока. Результаты измерений занести в табл. 5.1. Рассчитать значения мощности  $P$ , сопротивления  $R$  и абсолютной температуры  $T$  по формулам (5.8)–(5.10).

Результаты расчетов занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Результаты расчета мощности, выделяемой током в нити накала,  
и температуры нити накала**

№ п/п	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$R$ , Ом	$T$ , К	$T^4/10^{12}$ , К <sup>4</sup>
1						
2						
3						
...						
$n$						

Построить график зависимости мощности  $P$  от  $T^4/10^{12}$ , т. е.  $P = P \left( \frac{T^4}{10^{12}} \right)$ .

### Справочные данные:

- постоянная Стефана–Больцмана  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;
- постоянная Вина  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ;
- температурный коэффициент сопротивления вольфрама  $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ ;
- площадь нити лампы накаливания для лампы мощностью 100 Вт –  $S = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ; сопротивление при температуре 0 °С равно  $R_0 = 40 \text{ Ом}$ .
- площадь нити лампы накаливания для лампы мощностью 150 Вт –  $S = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ; сопротивление при температуре 0 °С равно  $R_0 = 25 \text{ Ом}$ .

2. Определить угловой коэффициент (тангенс угла наклона  $\text{tg}\alpha$  линейного участка зависимости  $P = P\left(\frac{T^4}{10^{12}}\right)$ , результат занести в табл. 5.2. Рассчитать коэффициент черноты  $\varepsilon$  вольфрамовой спирали по формуле (5.7). Результаты занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Коэффициент черноты вольфрамовой нити накала, длины волн максимумов равновесного теплового излучения**

$\text{tg}\alpha, \text{ Вт}/\text{К}^4$	$\sigma \cdot S, \text{ Вт}/\text{К}^4$	$\varepsilon$	$T_i, \text{ К}$	$\lambda_{\text{макс}}, \text{ МКМ}$

### Справочные данные:

Значение  $\varepsilon$  для сажи – 0,95; снега – 0,96; бумаги – 0,8÷0,9; вольфрама в области температур 1500 ÷ 2000 °С – 0,24 ÷ 0,31.

3. Рассчитать  $\lambda_{\text{макс}}$  по формуле (5.5) для трех температур на линейном участке графика зависимости  $P = P\left(\frac{T^4}{10^{12}}\right)$ . Использовать для этих целей температуры ( $T_1, T_2, T_3$ ), соответствующие двум крайним и средней точкам линейного участка. Какой области спектра принадлежат полученные значения длин волн?

4. Составить отчет по лабораторной работе согласно установленной форме.

## 5.5. Контрольные вопросы и упражнения

1. Дайте определения энергетической светимости, спектральной плотности энергетической светимости и спектральной поглощательной способности тела.

2. Сформулируйте и поясните законы Кирхгофа, Стефана–Больцмана, Вина.

3. Дайте определения понятий абсолютно черного, серого и не серого тел.

4. Горячее, но прозрачное пламя спиртовой горелки почти не испускает света, а более «холодное» пламя керосиновой лампы, содержащее частицы черной сажи, светится ярко. Почему?

5. Почти идеальным абсолютно черным телом является небольшое отверстие, просверленное в полом теле. Почему?

6. В плавильных печах стекольных заводов и коксовых печах нельзя рассмотреть никаких деталей. Почему?

7. Рассматривая окружающие предметы, мы видим, что одни из них кажутся зелеными, другие – красными и т. д. Не находится ли этот факт в противоречии с формулой (5.3), утверждающей, что испускаемое телами излучение определяется их температурой и не зависит от материала тела?

8. Зависимость  $P = P(T^4)$  является линейной в области высоких, а не низких температур. Почему?

9. Стенки термосов (сосудов Дьюара) делают зеркальными. Почему?

10. Излучение Солнца происходит из слоя толщиной около 200 км. Энергетическая светимость Солнца, усредненная по его поверхности, равна  $6,1 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. Вследствие большого удаления от Солнца ( $1,5 \cdot 10^{11}$  м) пучок, облучающий Землю, имеет лишь небольшой угол раскрытия (16'). В соответствии с этим, для элемента поверхности на Земле облученность составляет всего лишь  $1,35 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> (при перпендикулярном падении лучей и при пренебрежении потерями в атмосфере, составляющими примерно 50 %).

Рассчитайте температуру Солнца при условии, что оно излучает приблизительно как черное тело. Какая длина волны представлена в излучении с наибольшей интенсивностью? Соответствует ли это значению длине волны, при которой глаз человека наиболее чувствителен к излучению ( $\lambda = 0,555$  мкм)? Если соответствует, то почему?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить раздел «Фотоэффект» [1, с. 376–380], а также теоретическую справку к работе.

#### 6.1. Цель работы

1. Экспериментально проверить уравнение Эйнштейна.
2. Определить величину постоянной Планка.

#### 6.2. Расчетные зависимости

*Внешним фотоэлектрическим эффектом (или фотоэффектом)* называется явление испускания электронов из вещества под действием света. Впервые это явление было обнаружено в 1887 году Г. Р. Герцем и подробно изучено А. Г. Столетовым. Современная установка для исследования фотоэффекта схематично изображена на рис. 6.1.

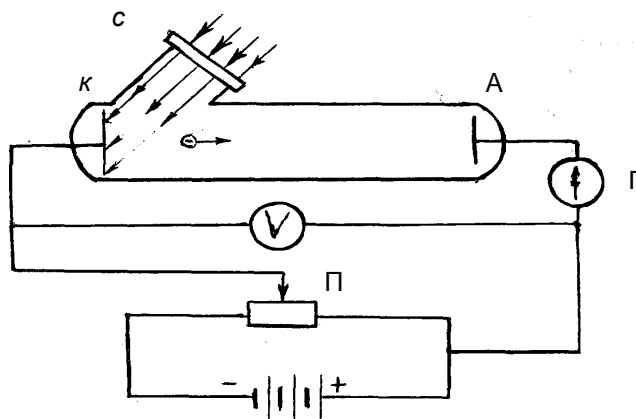


Рис. 6.1. Схема установки для исследования фотоэффекта

Свет проникает через окошко  $C$  в вакуумный баллон и освещает катод  $K$ , изготовленный из исследуемого материала. Электроны, выбиваемые из катода, перемещаются под действием поля к аноду  $A$ . В результате в цепи течет фототок, измеряемый гальванометром  $\Gamma$ . Напряжение между анодом и катодом может меняться с помощью потенциометра  $\Pi$ .

Зависимость величины фототока от приложенного напряжения показана на рис. 6.2 (при постоянном световом потоке  $\Phi_1 < \Phi_2$ ).



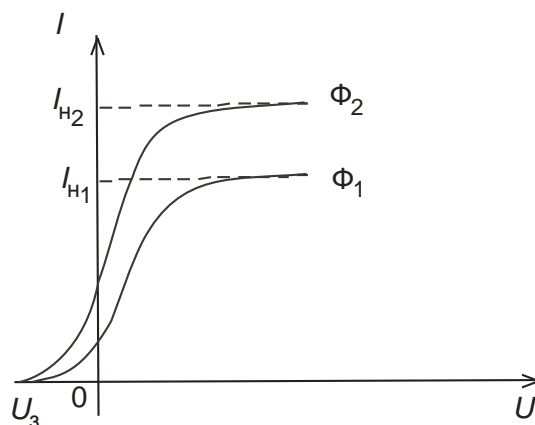


Рис. 6.2. График зависимости величины фототока от напряжения

Как видно на рис. 6.2, при напряжении, равном нулю, фототок не равен нулю. Это говорит о том, что фотоэлектроны после выхода из металла обладают некоторой кинетической энергией и по инерции достигают катода. Чтобы прекратить фототок, необходимо приложить некоторое обратное напряжение  $U_3$ , называемое *задерживающей разностью потенциалов* (*задерживающее напряжение*). Плавное уменьшение фототока до нуля при увеличении обратного напряжения указывает на то, что электроны вылетают с различными по величине скоростями. Поэтому задерживающая разность потенциалов определяет максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (6.1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона.

При увеличении разности потенциалов между анодом и катодом в прямом направлении фототок сначала возрастает, а потом, достигнув определенной величины  $I_H$ , остается постоянным. Это явление получило название *насыщения*, а величина  $I_H$  называется *фототоком насыщения* (см. рис. 6.2). Явление насыщения объясняется тем, что при некотором напряжении все выбиваемые светом из катода электроны достигают анода, и фототок не может возрасти без изменения светового потока. При изменении светового потока изменяется и величина тока насыщения.

В результате всесторонних исследований были установлены следующие законы фотоэффекта:

а) при неизменном спектральном составе света фототок насыщения прямо пропорционален величине светового потока (интенсивности света);

б) максимальная кинетическая энергия выбиваемых светом электронов прямо пропорциональна частоте световой волны;

в) существует наибольшая длина волны  $\lambda_k$  и соответствующая ей наименьшая частота  $\nu_k = \frac{c}{\lambda_k}$ , называемая *красной границей фотоэффекта* для данного вещества, при которой фотоэффект в этом веществе прекращается;

г) фотоэффект практически безынерционен; электроны выходят из металла не более чем через  $10^{-9}$  с после начала облучения.

Теоретическое объяснение явления фотоэффекта, соответствующее экспериментальным наблюдениям, было дано А. Эйнштейном в рамках квантовой теории света. Развивая гипотезу Планка о квантовом характере излучения электромагнитных волн, Эйнштейн распространил ее и на поглощение: свет не только излучается, но и поглощается отдельными порциями – квантами. Энергия квантов определяется частотой электромагнитной волны:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (6.2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота волны.

Квант света (фотон) существует как самостоятельное образование и может возникать или исчезать (поглощаться) только целиком.

При поглощении фотона электроном его энергия полностью переходит к электрону, и если эта энергия больше или равна работе выхода, то электрон может выйти из металла. Если энергия, полученная от фотона, превышает работу выхода, то электрон будет обладать кинетической энергией. Следовательно, энергия фотона, поглощенного электроном, расходуется на работу выхода и создание запаса кинетической энергии у вышедшего электрона:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad (6.3)$$

где  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из металла.

Уравнение (6.3) называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*. В этом уравнении второе слагаемое представляет собой значение максимальной кинетической энергии вышедших фотоэлектронов, которой обладают не все электроны. Это связано с тем, что электроны могут выбиваться из разных слоев вещества. При движении к поверхности электроны, выбиваемые из

более глубоких слоев, при столкновениях с узлами кристаллической решетки частично теряют свою энергию.

По теории Эйнштейна, каждый квант поглощается только одним электроном. Следовательно, число вырванных электронов должно быть пропорционально интенсивности света.

Поглощение кванта света электроном происходит практически мгновенно, и электрон сразу же выходит из вещества, поскольку в случае его задержки, при столкновениях с атомами он растеряет свою энергию и вообще не выйдет. Этим фактом объясняется безынерционность внешнего фотоэффекта.

Если решить уравнение Эйнштейна относительно кинетической энергии электронов,

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}}, \quad (6.4)$$

то она окажется пропорциональной частоте света. При уменьшении частоты падающего светового потока будет уменьшаться энергия квантов света и, следовательно, максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов. Если энергии кванта достаточно лишь на выход электрона из металла (кинетическая энергия такого фотоэлектрона равна нулю), имеет место условие:

$$h\nu_{\kappa} = A_{\text{ВЫХ}}. \quad (6.5)$$

Свет с меньшей частотой не будет давать фотоэффекта в данном веществе, следовательно, частота  $\nu_{\kappa}$  является красной границей фотоэффекта:

$$\nu_{\kappa} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\kappa} = \frac{c}{\nu_{\text{ВЫХ}}} = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}}, \quad (6.6)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Красная граница фотоэффекта зависит от работы выхода электрона, то есть от химической природы вещества и состояния его поверхности.

В данной работе требуется определить важнейшие характеристики фотоэффекта: красную границу  $\lambda_{\kappa}$ , работу выхода электрона для данного фотокатода  $A_{\text{ВЫХ}}$  и постоянную Планка  $h$ . Комбинируя уравнения (6.1) и (6.3), можно получить следующее равенство:

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{e}, \quad (6.7)$$

где  $U_3$  – задерживающая разность потенциалов,  $e$  – заряд электрона,  $\nu$  – частота квантов света, вызывающих испускание электронов из фотокатода.

Из формулы (6.7) видно, что график функции  $U_3 = f(\nu)$  (рис. 6.3) представляет собой прямую, не проходящую через начало координат, причем точка пересечения этой прямой с осью абсцисс соответствует значению граничной частоты ( $U_3 = 0$  при  $\nu = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h} = \nu_k$ ). Это можно использовать для определения значения  $\nu_k$ .

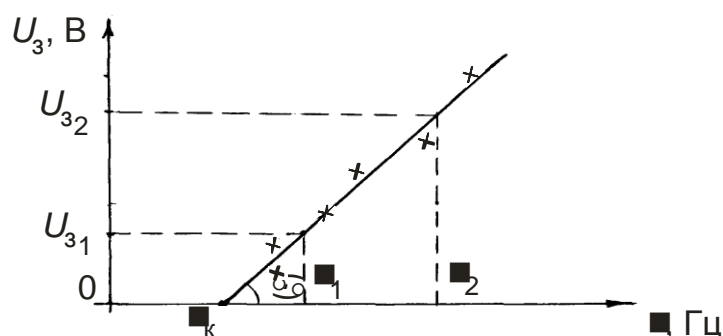


Рис. 6.3. График зависимости задерживающей разности потенциалов от частоты

Из формулы (6.7) также следует, что угловой коэффициент – тангенс угла наклона прямой  $U_3 = f(\nu)$  можно определить следующим образом:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{e}. \quad (6.8)$$

Следует иметь в виду, что в этой формуле  $\operatorname{tg}\alpha$  является размерной величиной и находится следующим образом:

- 1) по данным опытов строится график  $U_3 = f(\nu)$  (см. рис. 6.3);
- 2) для полученного графика (прямая линия) вычисляется угловой коэффициент наклона –  $\operatorname{tg}\alpha$ .

Значение  $\operatorname{tg}\alpha$  вычисляется по формуле:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{U_{32} - U_{31}}{\nu_2 - \nu_1}, \quad (6.9)$$

где  $U_{31}$  и  $U_{32}$  – задерживающие разности потенциалов, соответствующие частотам  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Постоянную Планка можно рассчитать по формуле (6.8), зная  $\text{tg}\alpha$ :

$$h = e \text{tg}\alpha. \quad (6.10)$$

### 6.3. Описание установки

Основные элементы экспериментальной установки (рис. 6.4) – фотоэлемент 1 и осветитель 2. Фотоэлемент помещен в светонепроницаемую коробку 3, имеющую окно 4 с рамкой для крепления светофильтра. Лампа осветителя питается от сети переменного тока. Электрическая цепь фотоэлемента питается постоянным током. Значение  $U_3$  измеряется вольтметром, наличие фототока регистрируется с помощью гальванометра.

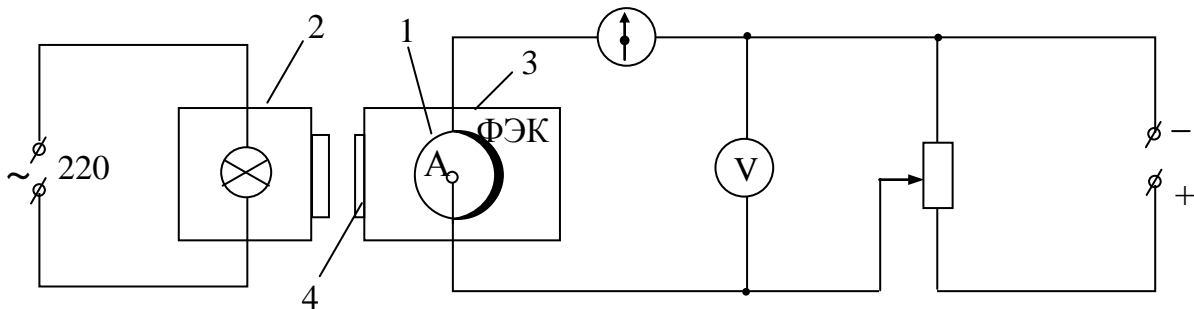


Рис. 6.4. Схема экспериментальной установки

### 6.4. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 6.4. Вставить светофильтр в окно коробки с фотоэлементом. Подать задерживающее напряжение на электроды фотоэлемента. Увеличивать задерживающее напряжение от 0 до такого значения, при котором фототок обратится в нуль. Значение задерживающего напряжения занести в табл. 6.1. Выполнить подобные измерения для всех имеющихся светофильтров. Результаты измерений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений и вычислений

Светофильтры	$\lambda$ , нм	$\nu$ , Гц	$U_3$ , В
Красный	630		
Оранжевый	565		

Желтый	545		
Зеленый	530		
Синий	410		
Фиолетовый	380		

2. Построить график  $U_3 = f(\nu)$ . Длина волны для расчета частоты для каждого светофильтра указана в табл. 6.1.

3. Используя формулу (6.9), вычислить тангенс угла наклона прямой  $U_3 = f(\nu)$ . Определить постоянную Планка по формуле (6.10). Определить по графику граничную частоту  $\nu_k$ . Вычислить работу выхода  $A_{\text{вых}}$  по формуле (6.5).

4. Составить отчет по лабораторной работе, который должен содержать: цель работы, список приборов и принадлежностей, схему установки, расчетные формулы, таблицу, график, расчет постоянной Планка, работы выхода. Необходимо сравнить экспериментально полученное значение величины постоянной Планка с ее табличным значением. Выводы должны содержать полученные значения  $\nu_k$ ,  $A_{\text{вых}}$ ,  $h$ .

## 6.5. Контрольные вопросы

1. Что называется внешним фотоэлектрическим эффектом?
2. Сформулируйте законы фотоэффекта.
3. Что такое задерживающая разность потенциалов? Что определяет задерживающая разность потенциалов?
4. Какова зависимость фототока от напряжения в прямом и обратном направлениях? Почему наступает насыщение? От чего зависит величина фототока насыщения?
5. От чего зависит значение работы выхода? От чего зависит значение красной границы фотоэффекта?
6. Опишите квантовую теорию фотоэффекта и объясните на ее основе законы фотоэффекта.
7. Как экспериментально с помощью фотоэффекта можно определить постоянную Планка? Как экспериментально с помощью фотоэффекта можно определить красную границу фотоэффекта?

8. Какие выводы относительно природы света можно сделать на основе исследований явления фотоэффекта?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ

При подготовке к работе необходимо предварительно изучить разделы «Атомное ядро и радиоактивность», «Ядерные реакции» [1, с. 466–479], [2, кн. 5, с. 277–301], а также теоретическую справку к работе.

#### 7.1. Цель работы

1. Изучить явление радиоактивности с помощью моделирующей компьютерной программы.

2. Исследовать зависимость интенсивности радиоактивного препарата от времени излучения, рассчитать период полураспада и постоянную распада.

3. Исследовать зависимость интенсивности радиоактивного препарата от расстояния между источником излучения (радиоактивный препарат) и счетчиком ионизирующих излучений.

4. Исследовать зависимость интенсивности  $\gamma$ -излучения от толщины поглотителя и материала поглотителя, рассчитать толщину слоя половинного ослабления и линейный коэффициент ослабления.

*Примечание.* Характеристики основных радиоактивных изотопов приведены в приложении.

#### 7.2. Расчетные зависимости

В 1896 году французский физик А. Беккерель обнаружил испускание ураном неизвестного проникающего излучения, названного им радиоактивным. Анализ радиоактивного излучения был выполнен М. Склодовской–Кюри.

*Радиоактивность* – явление самопроизвольного превращения неустойчивого ядра одного химического элемента в более устойчивое ядро другого

элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер. К числу основных таких превращений относятся:

- $\alpha$ -распад;
- $\beta$ -распад (в том числе К-захват);
- протонная радиоактивность;
- спонтанное деление тяжелых ядер.

Радиоактивность, наблюдающаяся у изотопов, существующих в природных условиях, называется *естественной*. Радиоактивность изотопов, полученных посредством ядерных реакций, называется *искусственной*.

Ядро состоит из  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов ( $N = A - Z$ , где  $A$  – массовое число нуклонов в ядре). Число радиоактивных атомов убывает со временем по экспоненциальному закону.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7.1)$$

где  $N$  – количество нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ,  $N_0$  – количество нераспавшихся ядер в начальный момент,  $\lambda$  – постоянная распада.

*Постоянная распада* дает вероятность того, что ядро атома радиоактивного вещества испытает превращение в единицу времени. Количество распавшихся за время  $t$  атомов определяется выражением:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (7.2).$$

*Период полураспада* ( $T_{1/2}$ ) – время, за которое распадается половина первоначального количества атомов. Величина  $T_{1/2}$  определяется условием:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda. \quad (7.3)$$

Период полураспада для известных в настоящее время радиоактивных веществ колеблется в пределах от  $3 \cdot 10^{-7}$  с до  $5 \cdot 10^{15}$  лет.

### **Виды радиоактивного распада**

*Альфа-распад* ( $\alpha$ -распад) состоит в самопроизвольном превращении исходного (материнского) ядра в другое с испусканием  $\alpha$ -частицы (ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ). Поток  $\alpha$ -частиц называется  $\alpha$ -излучением.  $\alpha$ -частицы как самостоятельные структурные образования в ядре до момента его превращения отсутствуют. Вследствие процессов, происходящих в ядре, нуклоны могут



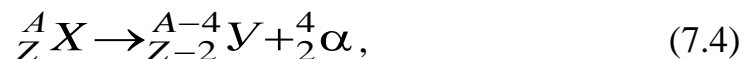
образовать  $\alpha$ -частицу, которая, взаимодействуя с другими нуклонами, приобретает энергию, достаточную для того, чтобы покинуть ядро атома. Скорости  $\alpha$ -частиц составляют от 14000 до 22500 км/с. Энергия  $\alpha$ -частиц – от 2 до 9 МэВ.

$\alpha$ -частицы обладают *высокой ионизирующей* способностью и *малой проникающей* способностью. При прохождении через вещество энергия  $\alpha$ -частиц тратится на возбуждение и ионизацию атомов среды и диссоциацию молекул. Длина пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе – 2,5–8,6 см, в жидких и твердых телах – значительно меньше (10–100 мкм), в живых тканях – порядка 70 мкм.  $\alpha$ -распад, вследствие перехода образовавшихся в результате распада возбужденных ядер в основное состояние, сопровождается  $\gamma$ -излучением.

Масса  $\alpha$ -частицы  $m_\alpha = 4 \text{ а.е.м.} = 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Заряд  $\alpha$ -частицы  $q_\alpha = 2|e| = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$

Схему  $\alpha$ -распада с учетом **правила смещения** записывают так:



где  $X$ ,  $Y$  – символы, соответственно, материнского и дочернего ядра;  $\alpha$  –  $\alpha$ -частица (ядро атома гелия  ${}^4_2 \text{He}$ );  $A$  – массовое число (равно общему числу протонов и нейтронов в ядре);  $Z$  – зарядовое число (равно заряду ядра – заряду протонов), порядковый номер элемента.

**Пример.** Превращение радона в полоний.



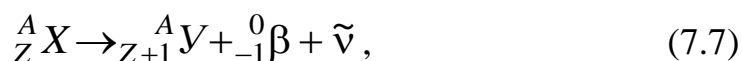
*Бета-распад* ( $\beta$ -распад) заключается во взаимопревращении нуклонов ядра – нейтрона и протона. Различают три вида  $\beta$ -распада: электронный, позитронный, К-захват.  $\beta$ -распад сопровождается испусканием антинейтрино (при  $\beta^-$ -распаде) или нейтрино (при  $\beta^+$ -распаде), не имеющих электрического заряда и массы покоя. Ионизирующая способность  $\beta$ -частиц меньше, чем у  $\alpha$ -частиц, проникающая – больше. При прохождении через вещество  $\beta$ -частицы теряют энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды. Длина свободного пробега  $\beta$ -частиц в воздухе – до десятков метров, в биологиче-

ской ткани – сантиметры (10–15 мм). При всех видах  $\beta$ -распада возможно возникновение  $\gamma$ -излучения.

*Электронный распад* ( $\beta^-$ -распад) проявляется в вылете из ядра электрона ( $\beta^-$ -частицы) вследствие внутриядерного превращения нейтрона в протон.



Схема  $\beta$ -распада с учетом правила смещения:



где  $\tilde{\nu}$  – антинейтрино.

**Пример.** Превращение трития в гелий:



*Позитронный распад* ( $\beta^+$ -распад) происходит в соответствии со схемой:



К  $\beta$ -распаду относится еще один вид превращений ядер – *электронный захват*. При этом процессе ядро захватывает один из электронов, расположенных на внутренних оболочках атома, чаще всего с  $K$ -слоя (редко  $L$  или  $M$ -слоя). В результате протон ядра превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино. Место в электронной оболочке заполняется другими электронами из вышележащих слоев, при этом возникает рентгеновское излучение. Ядро атома, имея прежнее массовое число, превращается в новое ядро с зарядовым числом, на единицу меньшим по сравнению с исходным ядром.

*Гамма-излучение* ( $\gamma$ -излучение) – поток  $\gamma$ -квантов, источником которых являются возбужденные ядра, образовавшиеся в результате  $\alpha$ - или  $\beta$ -распадов или других ядерных превращений.  $\gamma$ -кванты не имеют заряда, не имеют массы покоя, движутся со скоростью света, имеют очень большую энергию. Испускание  $\gamma$ -квантов не приводит к образованию ядер новых элементов. Возбужденные и стабильные ядра одного элемента отличаются только энергией.

Взаимодействие  $\gamma$ -квантов с веществом сводится к внешнему фотоэффекту, комптоновскому рассеянию, образованию пар электрон-позитрон, ионизации атомов, ядерному фотоэффекту. Ионизирующая способность по

сравнению с заряженными частицами мала, проникающая способность в тысячи раз больше, чем у  $\alpha$ -частиц и в воздухе составляет сотни метров.

*Нейтронное излучение* – поток нейтронов, которые образуются в процессе спонтанного (самопроизвольного) деления тяжелого ядра на два осколка. Процесс деления сопровождается испусканием нескольких  $\gamma$ -квантов и 2–3 нейтронов с энергией около 2 МэВ. Осколки деления испытывают последовательно несколько  $\beta$ -распадов.

### **Взаимодействие излучения с веществом**

Ионизирующее излучение, проходя через вещество, теряет энергию в результате процессов, связанных с ионизацией, тормозным излучением, рассеянием, фотоэффектом, эффектом Комптона, ядерными реакциями. Наиболее сильно взаимодействуют с веществом заряженные частицы, поэтому их проникающая способность меньше, чем у электромагнитного ионизирующего излучения. Большой проникающей способностью обладают нейтроны и  $\gamma$ -кванты. Заряженные  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы, а также  $\gamma$ -фотоны в веществе взаимодействуют с электронами и ядрами. По мере продвижения частицы в веществе уменьшается ее энергия и скорость.  $\alpha$ -частицы полностью задерживаются бумажным листом. Защитой от  $\beta$ -излучения служат тонкие алюминиевые и другие экраны. Самой большой проникающей способностью обладает  $\gamma$ -излучение (слой бетона, свинца).

Различают три возможных принципа защиты – *временем, расстоянием и экранировкой*. Защита временем – это ограничение продолжительности работы в поле излучения, защита расстоянием – интенсивность излучения уменьшается с увеличением расстояния от источника по закону обратных квадратов. Третий принцип – защита экранированием или поглощением. Ослабление потока радиоактивного излучения при прохождении через вещество описывается законом:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (7.10)$$

где  $I, I_0$  – интенсивность излучения после и до входа в слой вещества соответственно;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления излучения;  $x$  – толщина слоя вещества.

*Толщина слоя половинного ослабления  $d_{1/2}$*  представляет собой толщину слоя вещества, пройдя через которое интенсивность ионизирующего излучения уменьшается в 2 раза.

### **Элементы дозиметрии**

*Ионизирующие излучения* – излучения, взаимодействие которых с веществом приводит к образованию электрически заряженных частиц. К корпускулярным ионизирующим излучениям относятся потоки  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, нейтронов. Электромагнитным ионизирующим излучением являются рентгеновское и  $\gamma$ -излучение. Воздействие ионизирующих излучений на вещество называется *облучением*.

*Источниками* естественной радиации являются: космические лучи внеземного происхождения, радиационные пояса Земли, естественная радиация в организме человека, излучение радиоактивных веществ в земной коре, продукты распада при ядерных реакциях. В дополнение к естественному облучению человек подвергается облучению от источников рентгеновского излучения в медицине, воздействию радиоактивных осадков в результате испытаний ядерных взрывов, сжигания угля, применения фосфатных удобрений, использования воздушного и космического транспорта, строительных материалов (гранит, бетон, туф, пемза), пребывания в плохо вентилируемых помещениях и т. д.

В последние годы выявилась особая роль радона в облучении людей в бытовых условиях и на производстве. Средний житель Земли за счет радона получает дозу порядка 100 мбэр. Мощность дозы космических лучей возрастает в 32 раза при подъеме на 1,5 км над уровнем моря. На Земле существуют населенные области с повышенным радиационным фоном. Это, например, высокогорные города Богота, Лхаса, где уровень космического излучения примерно в 5 раз выше, чем на уровне моря. Это также песчаные зоны с большой концентрацией минералов, содержащих фосфаты с примесью урана и тория – в Индии (штат Керала) и Бразилии (штат Эспириту-Санту). Можно упомянуть участок выхода вод с высокой концентрацией радия в Иране (г. Ромсер). В любом месте радиационный фон изменяется от точки к точке, а также в каждой конкретной точке со временем. Эти колебания фона могут

быть весьма значительными. В обжитых местах дополнительно накладываются факторы деятельности предприятий, работы транспорта и т. д. Например, на аэродромах, благодаря бетонному покрытию с гранитным щебнем, фон, как правило, выше, чем на прилегающей местности. Измерения радиационного фона в г. Москве позволяют указать типичные значения фона на улице (открытой местности) – 8–12 мкР/ч, в помещении – 15–20 мкР/ч.

Различают однократное (острое) и хроническое облучение. Под внутренним облучением понимают такой процесс, при котором источники излучения находятся внутри человеческого организма, попадая туда при вдыхании, а также через повреждения кожного покрова. Внутреннее облучение во много раз более опасно, чем внешнее.

*Поглощенная доза* равна отношению энергии излучения к массе объекта. Единица измерения – 1 Грей.

*Экспозиционная доза* измеряется в Рентгенах (Р).

*Мощность дозы* равна отношению поглощенной дозы ко времени облучения. Единица измерения – 1 рад/ч (1 Р = 0,93 рад).

*Эквивалентная доза* равна поглощенной дозе, умноженной на «коэффициент качества». Единица измерения 1 Зиверт (Зв). Внесистемная единица 1 бэр =  $10^{-2}$  Зв.

При дозах облучения не более 25 бэр изменений в органах и тканях организма человека не наблюдается. Незначительные кратковременные изменения состава крови возникают только при дозе облучения 50 бэр. Для первой категории (персонал – «А» по терминологии «Норм безопасности») допустимая доза облучения составляет 5 бэр/год, для второй (население – категория «Б») – 0,5 бэр/год. Численное значение смертельной дозы  $\gamma$ -излучения –  $(600 \pm 100)$ Р.

**Пример.** Некоторые источники радиации и показатели излучения:

0,001 мЗв – трехчасовой просмотр в день телевизора в течение года;

3,7 мЗв – флюорография;

40 мЗв – 2,5 часовой полет на сверхзвуковом самолете;

50 мЗв – полет на дозвуковом самолете при продолжительности полета 7,5 часов;

750 мЗв – кратковременное изменение состава крови;

1000 мЗв – нижний уровень лучевой болезни;  
 4500 мЗв – гибель 50 % облученных в течение 30 суток;  
 6000–7000 мЗв – гибель 100 % облученных.

### 7.3. Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе используется метод моделирования на компьютере. Внешний вид рабочей панели лабораторной установки представлен на рис. 7.1.

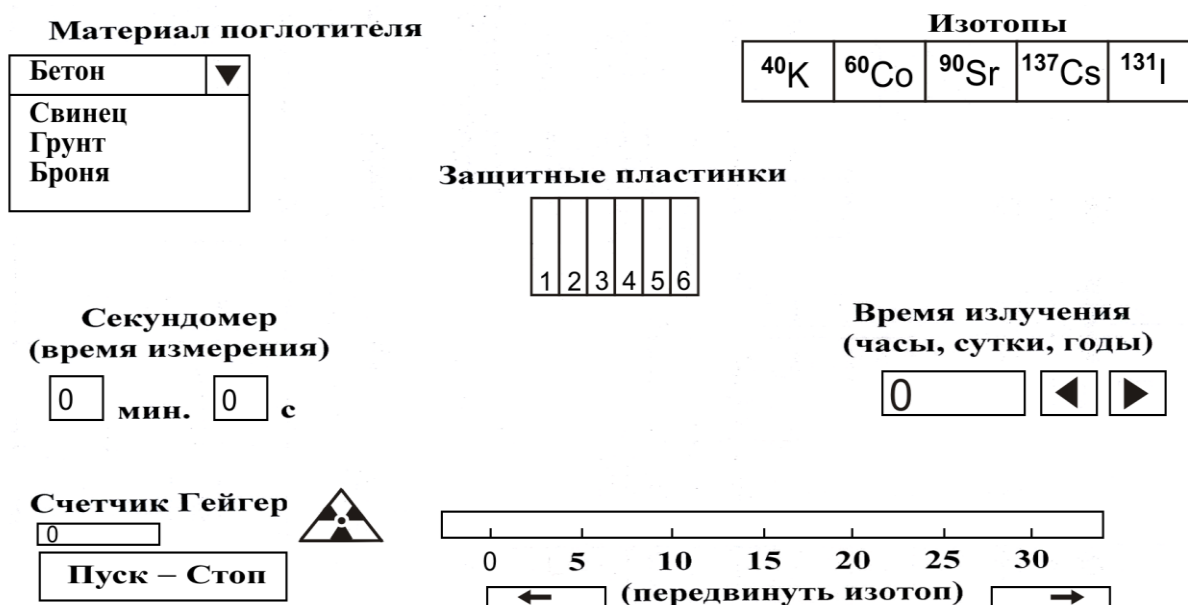


Рис. 7.1. Внешний вид рабочей панели на экране компьютера

На рабочей панели, отображенной на экране компьютера (см. рис. 7.1), представлены следующие источники радиоактивного излучения: калий  $^{40}\text{K}$ , кобальт  $^{60}\text{Co}$ , стронций  $^{90}\text{Sr}$ , цезий  $^{137}\text{Cs}$ , йод  $^{131}\text{I}$ . Приемником излучения служит счетчик Гейгера (имитация). Время измерения отсчитывается секундомером. Положение источника излучения по отношению к счетчику Гейгера определяется по специальной шкале. Существует возможность использовать разные материалы-поглотители ионизирующего излучения (свинец, броня, бетон, грунт) и варьировать толщину слоя поглотителя (от одной до шести пластин толщиной 2 мм каждая). Имеется указатель времени излучения радиоактивного источника (часы, сутки, годы).

Установка требуемых объектов излучения (изотопов) на линейку (по ней определяется расстояние между радиоактивным источником и счетчиком Гейгера), по которой определяется расстояние до счетчика Гейгера, осуществляется наведением курсора и щелчком «мыши» по соответствующему элементу. Возвращение на исходную позицию также производится щелчком «мыши». Расстояние можно изменять щелчком «мыши» на указателях, расположенных под линейкой. Секундомер, определяющий время измерения, включается и выключается нажатием кнопок «Пуск–Стоп». Количество импульсов, которые отсчитывает счетчик Гейгера за определенное время излучения изотопа, высвечивается в соответствующем окне на экране. Время излучения радиоактивного изотопа (в часах, сутках, годах) устанавливается с помощью щелчка «мыши» по указателю в соответствующем окне.

***Примечание.** Время измерения (счета импульсов) задается преподавателем и не меняется при всех измерениях!*

#### **7.4. Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с теорией по данной лабораторной работе и указаниями по выполнению упражнений.
2. Оформить бланк отчета (расчетные формулы, таблицы).
3. Получить допуск к выполнению работы.
4. Получить индивидуальное задание у преподавателя.

**Задание 1.** Исследовать зависимость интенсивности излучения радиоактивного препарата от времени.

1. Провести измерение естественного фона, не устанавливая перед счетчиком радиоактивный препарат. Для этого включить секундомер и счетчик Гейгера щелчком мыши по кнопке «Запуск» в левой части экрана компьютера. Время измерения указано в индивидуальном задании и не меняется в течение эксперимента. Значение естественного фона (количество импульсов, зарегистрированных счетчиком), занести в табл. 7.1. Рассчитать погрешности.

Таблица 7.1

**Результаты измерений естественного фона**

№	Время измерения, $t$ , с	Число импульсов, $N$	Естественный фон, имп/с	$\epsilon$ , %	$N \pm \Delta N$ , имп/с
1					
2					
3					
Ср.					

2. Подготовить секундомер к следующим измерениям, нажав кнопку «Пуск–Стоп» и сбросив показания предыдущего измерения.

3. Щелчком мыши по заданному изотопу (в правом углу рабочей панели экрана компьютера) установить его на линейке перед счетчиком Гейгера. Стрелками прокрутки в нижней части рабочей панели передвинуть изотоп и совместить левый край заданного изотопа с меткой линейки – по указанию в индивидуальном задании (задается расстояние от источника излучения до счетчика).

4. Выставить время излучения радиоактивного препарата стрелками прокрутки (в нижнем правом углу рабочей панели).

5. Включить секундомер и счетчик Гейгера. Провести счет импульсов при наличии радиоактивного препарата перед счетчиком. Данные занести в табл. 7.2.

**Примечание.** Естественный фон (количество импульсов в п. 1) следует вычитать из всех полученных результатов при последующих измерениях.

Таблица 7.2

**Результаты измерений интенсивности излучения  
радиоактивного препарата**

№	Время излучения (часы, сутки, годы)	Количество импульсов $N$ , имп/с	
		С фоном	Без фона
Изотоп:		Расстояние, см	Время измерения – 10 с
1			
2			
3			
4			
5			



6. Изменить время излучения препарата стрелками прокрутки (в нижнем правом углу рабочей панели) в соответствии с индивидуальным заданием. Провести измерения в соответствии с п. 5. Результаты занести в табл. 7.2.

7. Провести измерения для других промежутков времени излучения препарата в соответствии с п. 5. Результаты занести в табл. 7.2.

8. Рассчитать период полураспада для данного радиоактивного препарата по формуле, выбрав результаты двух измерений (не соседние результаты):

$$T_{1/2} = (t_m - t_n) \cdot (\ln 2) / \ln(I_n / I_m), \quad (7.11)$$

где  $t_m, t_n$  – время излучения в часах, сутках, годах;  $I_n, I_m$  – количество импульсов.

9. Сделать расчет периода полураспада для трех произвольных пар результатов. Вычислить среднее значение.

10. Рассчитать постоянную распада с использованием среднего периода полураспада для данного изотопа по формуле:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}. \quad (7.12)$$

11. Сделать выводы.

12. По указанию преподавателя провести измерения согласно п.п. 3–11 для другого источника ионизирующего излучения.

**Задание 2.** Исследовать зависимость интенсивности радиоактивного излучения от расстояния (между источником и счетчиком).

1. Подготовить установку к работе: стрелками прокрутки установить на линейке указанный изотоп на заданном в указаниях расстоянии; установить заданное время излучения изотопа; подготовить к измерениям секундомер.

**Примечание.** Расстояние отсчитывается по левому краю значка изотопа на линейке.

2. Включить секундомер и счетчик Гейгера и измерить число импульсов излучения на заданном расстоянии. Данные занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

**Результаты измерений интенсивности излучения радиоактивного препарата**

№	Расстояние до источника $R$ , см	Количество импульсов $N$ , имп/с	
		С фоном	Без фона

	Изотоп:	Время излучения	Время измерения – 10 с
1	5		
2	10		
3	15		
4	20		
5	25		
6	30		

3. Провести аналогичные измерения с данным изотопом, устанавливая его на других расстояниях, указанных в индивидуальном задании. Данные занести в табл. 7.3.

4. Сделать выводы.

**Задание 3.** Исследовать поглощение  $\gamma$ -излучения (зависимость интенсивности излучения радиоактивного изотопа от толщины слоя поглотителя и материала поглотителя).

1. Подготовить установку к работе: стрелками прокрутки установить на линейке указанный изотоп на заданном в указаниях расстоянии; установить заданное время излучения изотопа; подготовить к измерениям секундомер.

2. Включить секундомер и счетчик Гейгера, измерить число импульсов излучения без поглотителя. Данные занести в табл. 7.4.

Таблица 7.4

**Результаты измерений интенсивности излучения  
радиоактивного препарата**

№	Число пластин поглотителя	Толщина слоя, мм	Количество импульсов, N, имп	
			С фоном	Без фона
Изотоп:		Расстояние см	Время излучения ...	
1	0	0		
2	1	2		
3	2	4		
4	3	6		
5	4	8		
6	5	10		

3. Установить между источником радиоактивного излучения и счетчиком одну пластину указанного в задании поглотителя (в левой части рабо-

чей панели щелчком мыши выбрать препарат, пластину поглотителя «сбросить» стрелками прокрутки). Толщина пластины – 2 мм.

4. Включить установку. Измерить число импульсов излучения. Данные занести в табл. 7.4.

5. Повторить измерения согласно п. 3 данного задания, установив между источником и счетчиком 2, 3, 4, 5, 6 пластин соответственно. Данные занести в табл. 7.4.

6. Исследуемый поглотитель вернуть на место, выставить вместо него другой поглотитель. Повторить измерения согласно п.п. 3–5. Данные занести в табл. 7.4.

7. Рассчитать толщину слоя половинного поглощения для трех пар результатов по формуле:

$$d_{1/2} = (d_m - d_n) \cdot (\ln 2) / \ln (I_n / I_m), \quad (7.13)$$

где  $d_m, d_n$  – толщина  $m$  и  $n$  пластин,  $I_n, I_m$  – количество импульсов при  $m$  и  $n$  пластинах.

Найти среднее значение толщины слоя половинного ослабления  $d_{1/2}$ .

8. Используя значение среднего коэффициента половинного ослабления, рассчитать линейный коэффициент поглощения для данного вещества по формуле:

$$\mu = \ln 2 / d_{1/2}. \quad (7.14)$$

9. Сделать выводы.

10. Оформить отчет по лабораторной работе согласно установленной форме.

11. Ответить на контрольные вопросы.

## 7.5. Контрольные вопросы

1. В чем сущность явления радиоактивности?

2. Перечислите виды радиоактивного распада. Назовите их характеристики.

3. Приведите закон радиоактивного распада. Чем характеризуется период полураспада. Объясните понятие постоянной радиоактивного распада.

4. В чем сущность закона поглощения? Каков смысл слоя половинного ослабления? Что такое линейный коэффициент поглощения?

5. Назовите физические процессы, обуславливающие взаимодействие ионизирующих излучений с веществом.

6. Перечислите источники естественной радиации.
7. Каковы основные дозиметрические характеристики ионизирующих излучений?
8. Каков физический смысл дефекта массы, энергия связи нуклонов в ядре, удельной энергии связи?
9. Назовите виды ядерных реакций. Что такое энергия ядерных реакций? Приведите пример применения ядерных реакций.
10. Какие существуют методы регистрации радиоактивных излучений? Какие виды ионизирующих излучений регистрирует счетчик Гейгера-Мюллера?
11. Почему число импульсов, регистрируемых счетчиком за одно и то же время от одного и того же источника, непостоянно?

## **Характеристики основных радиоактивных изотопов**

**Радон-222.** Газ, испускающий  $\alpha$ -частицы. Постоянно образуется в горных породах. Опасен при накоплении в шахтах, подвалах, на нижних этажах зданий. Необходима вентиляция (проветривание). Период полураспада – 3,8 суток.

**Ксенон-133.** Газообразные изотопы. Постоянно образуются и распадаются в процессе работы атомного реактора. В качестве защиты используют изоляцию. Период полураспада – 5 суток.

**Йод-131.** Испускает  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -излучение. Образуется при работе атомного реактора. Жвачными животными усваивается вместе с травой и переходит в молоко. Накапливается в щитовидной железе человека. В качестве защиты от внутреннего облучения применяют «йодную диету», т. е. вводят в рацион человека стабильный йод. Период полураспада – 8 суток.

**Криптон-85.** Тяжелый газ, испускающий  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -излучение. Входит в состав отработанного топливного элемента реактора. Выделяется при их хранении. Защита – изолированное помещение. Период полураспада – 10 лет.

**Стронций-90.** Металл, испускающий  $\beta$ -частицы. Основной продукт деления в радиоактивных отходах. Накапливается в костных тканях человека. Период полураспада – 29 лет.

**Цезий-137.** Металл, испускающий  $\alpha$ -частицы и  $\gamma$ -излучение. Накапливается в клетках мышечной ткани. Период полураспада – 30 лет.

**Радий-226.** Металл, испускающий  $\gamma$ -излучение,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы. Защита – укрытия и убежища. Период полураспада – 1600 лет.

**Углерод-14.** Испускает  $\beta$ -частицы. Естественный природный изотоп углерода. Используется при определении возраста археологического материала. Период полураспада – 5500 лет.

**Плутоний-239.** Испускает  $\alpha$ -частицы. Содержится в радиоактивных отходах. Защита – качественное захоронение радиоактивных отходов. Период полураспада – 24000 лет.

**Калий-40.** Испускает  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -излучение. Содержится и замещается (выводится) во всех растениях и животных. Период полураспада – 1,3 млрд лет.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2003. – 542 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 5 кн. / И. В. Савельев. – М. : Астрель, 2003.

Кн. 1 : Механика. – 336 с.

Кн. 2 : Электричество и магнетизм. – 336 с.

Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – 208 с.

Кн. 4 : Волны. Оптика. – 256 с.

Кн. 5 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 368 с.

Лабораторный практикум

ФИЗИКА:

ОПТИКА, ОСНОВЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

Составители:

ПУГАЧЁВ

ЮРИЙ ФЕДОРОВИЧ

ЛЕОНОВ

СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

САМОХИНА

СВЕТЛАНА СЕРГЕЕВНА

*Редактор Е. А. Сиротина*

*Компьютерная верстка И. А. Ерёмкина*

*Разработчик электронного учебника Н.В. Цысс*

---

Подписано в печать

2010. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,04.

Тираж

Заказ

---

РИО и типография УВАУ ГА(И). 432071, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8