



**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Башкирский государственный аграрный университет»**

Кафедра теплоэнергетики и физики

## **Б1.О.12 ФИЗИКА**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ**

Направление подготовки  
**35.03.06 Агроинженерия**

Профиль подготовки:  
**Цифровой инжиниринг в АПК  
Автотроника и фирменный сервис**

**Квалификация (степень) выпускника  
Бакалавр**

Форма обучения

Очная, заочная

Рекомендовано к изданию методической комиссией энергетического факультета (протокол №7 от «24» 03 2022 года)

Составитель: канд. физ.-мат. наук, доцент Юмагужин Р.Ю.

Рецензент: проф. Аипов. Р.С.

Ответственный за выпуск:

И.о.зав. кафедрой теплоэнергетики и физики, канд. тех. наук Харисов Д.Д.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа №1. Изучение законов сохранения импульса и энергии. Определение скорости пули методом баллистического маятника	4
Лабораторная работа №2. Изучение вращательного движения и определение моментов инерции тел	8
Лабораторная работа №3. Внутреннее трение в жидкостях. Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей методом Стокса	12
Лабораторная работа №4. Изучение гармонических колебаний математического маятника и определение ускорения свободного падения тел	16
Лабораторная работа №5 Изучение свободных колебаний пружинного маятника	20
Лабораторная работа №6 Определение влажности воздуха	25
Лабораторная работа №7 Газовые процессы и определение адиабатической постоянной	30
Лабораторная работа №8 Явление поверхностного натяжения жидкости. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	35
Лабораторная работа №9 Изучение электростатического поля методом моделирования	39
Лабораторная работа №10 Исследование зависимости электрического сопротивления проводника от температуры	43
Лабораторная работа №11 Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли	46
Лабораторная работа №12 Определение удельного заряда электрона методом фокусировки в магнитном поле	50
Лабораторная работа №13 Катушка в цепи переменного тока. Определение индуктивности катушки	55
Лабораторная работа №14 Определение показателя преломления жидкостей рефрактометром	58
Лабораторная работа №15 Изучение явления дифракции света на дифракционной решетке	62
Лабораторная работа №16 Определение концентрации глюкозы в растворе по углу вращения плоскости поляризации	67
Лабораторная работа №17 Изучение законов теплового излучения	74
Лабораторная работа №18 Изучение фотоэффекта и определение характеристик вакуумного фотоэлемента	79
Лабораторная работа №19 Изучение линейчатых спектров ртути, неона и водорода	83
Библиографический список	87

## ВВЕДЕНИЕ

В лабораторном практикуме приведены методические указания к лабораторным работам. При подготовке к занятию студент обязан изучить соответствующие темы учебников из библиографического списка и составить конспект методического указания к лабораторной работе.

Студент приступает к выполнению лабораторной работы только после получения допуска у преподавателя. После выполнения экспериментальной части необходимо подготовить отчет по методическим указаниям и представить преподавателю для проверки до окончания занятия.

### Лабораторная работа № 1 Изучение законов сохранения импульса и энергии. Определение скорости пули методом баллистического маятника

**Цель и задачи работы:** Изучение законов сохранения импульса, энергии. Экспериментальное определение скорости полета пули.

#### 1 Общие сведения

Пусть тело с массой  $m$  движется со скоростью  $\vec{v}$ . Тогда это движение можно охарактеризовать двумя физическими величинами: импульсом  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$  и кинетической энергией  $W_{\text{кин}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$ . Кроме того тело, поднятое на высоту  $h$  над землей (нулевым уровнем), приобретает

потенциальную энергию, равную  $W_{\text{пот}} = m \cdot g \cdot h$ . Сумма кинетической и потенциальной энергий есть полная механическая энергия тела  $W = W_{\text{кин}} + W_{\text{пот}}$ .

Система  $n$  тел называется замкнутой, если на нее не действуют внешние силы, при этом тела, входящие в систему, могут взаимодействовать между собой, т.е. на тела могут действовать внутренние силы.

Для замкнутой системы выполняется закон сохранения импульса: сумма импульсов тел замкнутой системы во времени не изменяется

$$\vec{P} = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2 + \dots + m\vec{v}_n = \text{const.}$$

Для системы  $n$  тел (не обязательно замкнутой) выполняется закон сохранения механической энергии, если на нее действуют только консервативные (внешние и внутренние) силы (например, силы тяжести, упругости):

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n = \text{const.}$$

Такие системы называются консервативными.

При наличии внешних неконсервативных сил (например, силы трения) полная механическая энергия системы будет изменяться на величину работы этих сил:  $\Delta W_{\text{незамк}} = A_{\text{неконс.}}$

#### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

В комплект лабораторной установки входят баллистический маятник, пневматическое ружье, пуля, весы, мерная линейка.

Баллистический маятник (рисунок 1) представляет собой тело 2 с массой  $M$ , свободно подвешенное на нерастяжимой нити.

Вылетевшая из воздушного ружья пуля 1, имея скорость  $\vec{v}$ , ударяет в центр маятника 2 (центральный удар). Предполагается, что пуля 1 и тело 2 составляют замкнутую систему. Если в результате удара пуля застревает в теле 2 (абсолютно неупругий удар), система начинает двигаться как единое целое с массой  $M + m$  со скоростью  $\vec{v}_2$ . Для абсолютно неупругого удара справедлив закон сохранения импульса:

$$m \cdot \vec{v} + M \cdot \vec{v}_1 = (M + m) \cdot \vec{v}_2, \quad (1)$$

или в скалярной форме

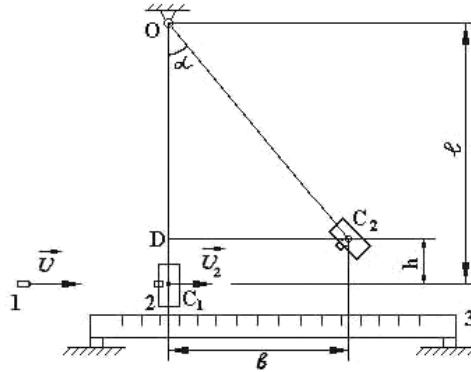


Рисунок 1 Схема лабораторной установки

$$m \cdot v + M \cdot v_1 = (M + m) \cdot v_2,$$

где  $m \cdot v + M \cdot v_1$  – импульс системы до удара;  $(M + m) \cdot v_2$  – импульс системы после удара;  
Маятника до удара покоился:  $v_1 = 0$ , тогда  $m \cdot v = (M + m) \cdot v_2$ , а так как  $M \gg m$ , то  $m \cdot v = M \cdot v_2$ ,  
отсюда

$$v_2 = \frac{m}{M} \cdot v. \quad (2)$$

Таким образом, в результате удара система « $M + m$ » приобретает кинетическую энергию, с учетом (2):

$$W_{\text{кин}} = \frac{(M + m) \cdot v_2^2}{2} = \frac{(M + m) \cdot m^2 v^2}{2M^2}. \quad (3)$$

Обладая кинетической энергией (3), маятник (система « $M + m$ ») максимально отклоняется от вертикали на угол  $\alpha$ , при котором центр масс системы из положения  $C_1$  поднимается на высоту  $h$  до остановки (положение  $C_2$ ), так что вся кинетическая энергия (3) системы переходит в потенциальную энергию, равную

$$W_{\text{пот}} = (M + m) \cdot g h.$$

Из закона сохранения энергии для замкнутой системы следует  $W_{\text{кин}} = W_{\text{пот}}$  или  $\frac{(M + m) \cdot m^2 v^2}{2M^2} = (M + m) \cdot g h$

$$\frac{m^2 \cdot v^2}{2M^2} = g h$$

Упрощая уравнение, получаем  
Отсюда скорость пули:

$$v = \frac{M}{m} \cdot \sqrt{2 g h}. \quad (4)$$

Величины  $m$  и  $M$  определяются взвешиванием, неопределенным в (4) остается параметр  $h$ . Из рисунка 1 следует

$$h = DC_1 = OC_1 - OD = OC_1 - OC_2 \cdot \cos \alpha = l \cdot (1 - \cos \alpha),$$

где  $OC_1 = OC_2 = l$  – длина нити. Заменяя  $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \alpha/2$ , получаем  $h = l \cdot 2 \sin^2 \alpha/2$ .

На данной установке отклонение маятника мало (угол  $\alpha$  меньше  $4^\circ \div 5^\circ$ ), следовательно  $\sin \alpha/2 \approx \alpha/2$  и

$$h = 2l \cdot (\alpha/2)^2. \quad (5)$$

При выполнении опыта измерение угла  $\alpha$  невозможно, поэтому выразим его через отклонение  $b$ . Как следует из рисунка 1  $\sin \alpha = \frac{DC_2}{OC_2}$  или  $\alpha = \frac{b}{l}$ . Тогда из (5) следует  $h = \frac{b^2}{2l}$ .

Подставляя последнее выражение в (4), окончательно получаем зависимость для скорости пули

$$v = \frac{M}{m} b \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (6)$$

### 3 Порядок выполнения и требования к оформлению результатов

3.1 Перед занятием необходимо законспектировать следующий теоретический материал: /1/ С.30-34, 53-62; /2/ С.19-21, 27-34; /3/ С.74-75, 95-97, 98-105.

Занести в конспект методику выполнения работы, необходимые таблицы и формулы (разделы 2, 3).

3.2 Измерить массу пули  $\overline{m}$  взвешиванием, погрешность  $\Delta m = \Delta m_{\text{инс}}$ , где  $\Delta m_{\text{инс}}$  – инструментальная погрешность. Масса маятника  $\overline{M}$  и её погрешность  $\Delta M$  указаны на лабораторной установке.

Поскольку средние значения и погрешности величин масс  $\overline{m}$ ,  $\Delta m$ ,  $\overline{M}$ ,  $\Delta M$  входят в расчетные формулы (6) и (7) в отношениях друг к другу, то все они, при занесении в таблицу 1, должны быть указаны в одинаковых единицах измерения – либо в кг, либо допускается в г.

3.3 Измерить длину подвеса  $l$ . Абсолютную погрешность  $\Delta l$  взять равной погрешности попадания пули в центр маятника при выстреле из ружья:  $\Delta l = 0,005$  м.

Занести в таблицу 1 значение  $g \pm \Delta g$ . Здесь  $\Delta g$  – абсолютная погрешность табличной величины  $g$  составляет половину от точности ее представления  $C$ :  $\Delta g = C / 2$ .

Например, если в работе берется значение  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>, то точность ее представления  $C = 0,1$  м/с<sup>2</sup>, тогда  $\Delta g = 0,05$  м/с<sup>2</sup>. Или, если берется  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>, то  $C = 0,01$  м/с<sup>2</sup>, тогда  $\Delta g = 0,005$  м/с<sup>2</sup>.

3.4 Вначале эксперимента отметить по шкале 3 положение стрелки 4 при неподвижном состоянии тела 2.

3.5 Произвести выстрел из воздушного ружья строго в центр маятника 2, отметить отклонение  $b$  маятника по шкале 3. Занести значение  $b$  в таблицу 2.

Опыт повторить не менее 5 раз.

Таблица 1 Табличные и однократно измеренные величины

Обозначения физических величин			
$\overline{M} \pm \Delta M, \text{ г}$	$\overline{m} \pm \Delta m, \text{ г}$	$g \pm \Delta g, \text{ м/с}^2$	$\overline{l} \pm \Delta l, \text{ м}$
		$9,81 \pm 0,005$	

Таблица 2 Экспериментальные и расчетные величины

Обозначения физических величин					
№ п/п	$b_i$	$\Delta b_i$	$(\Delta b_i)^2$	$\overline{v}$	$\Delta v$
1					
2					
3					
4					
5					
средние значения			$\sum_{i=1}^5 (\Delta b_i)^2$	—	—

3.6 Вычислить среднее значение отклонения  $\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i$ , где  $n = 5$  – количество опытов; абсолютные погрешности каждого измерения  $\Delta b_i = |\bar{b} - b_i|$ ; квадраты этих погрешностей  $(\Delta b_i)^2$ . Найти сумму квадратов  $\sum_{i=1}^n (\Delta b_i)^2$ .

3.7 На основании известных уже величин  $\bar{M}$ ,  $\bar{m}$ ,  $\bar{b}$ ,  $g$ ,  $\bar{l}$ , вычислить среднее значение скорости пули  $\bar{v}$  по формуле (6).

3.8 Рассчитать среднеквадратическое отклонение:

$$S_{\bar{b}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta b_i)^2}{n(n-1)}}.$$

По таблице коэффициентов Стьюдента из Приложения А найти  $t_{p,n}$  для  $n=5$  и выбранной доверительной вероятности, например  $p = 0,95$ .

Определить доверительный интервал для  $b$ :  $\Delta b = S_{\bar{b}} \cdot t_{p,n}$ .

3.9 Сравнить найденный доверительный интервал  $\Delta b$  с инструментальной погрешностью  $\Delta b_{инс}$  измерительной линейки и большую из них использовать для дальнейших расчетов, например, в формуле (7). ( $\Delta b_{инс} = c / 2$ , где  $c$  – цена деления линейки).

3.10. Находим относительную погрешность:

$$\varepsilon_v = \sqrt{\left(\frac{\Delta M}{\bar{M}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\bar{m}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{\bar{b}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta l}{\bar{l}}\right)^2}. \quad (7)$$

3.11 Определить абсолютную погрешность  $\Delta v = \varepsilon_v \cdot \bar{v}$  и оставить в ней одну значащую цифру, используя правила округления (например, число 0,5861 следует записать как 0,6).

3.12 Провести округление величины  $v$  в соответствии с погрешностью  $\Delta v$  (например, если  $\Delta v$  представлено с точностью до десятых:  $\Delta v = 0,6$ , то и  $\bar{v} = 32,4835$  надо округлить до десятых:  $\bar{v} = 32,5$ ).

Окончательный результат скорости пули представить в виде:

$$v = (\bar{v} \pm \Delta v) \text{ м/с},$$

например,  $v = (32,5 \pm 0,6) \text{ м/с}$ . (Примечание: здесь в качестве примера взяты произвольные числа, поэтому их не следует переписывать.)

## 4 Контрольные вопросы

4.1 Что является мерой инертности тела при поступательном движении? Единицы измерения?

4.2 Что называется импульсом? Это скалярная или векторная величина? В чём выражается суть закона изменения импульса? Что представляет собой импульс силы?

4.3 Привести примеры из практики на закон изменения импульса.

4.4 Что такое система тел? Какая система называется замкнутой (изолированной) и незамкнутой (неизолированной)?

4.5 Как формулируется и выражается математически закон сохранения импульса (в скалярной и векторной форме)? Привести примеры на закон сохранения импульса.

4.6 Какие виды энергии вы знаете (назвать и выразить формулой)? Сформулировать закон сохранения энергии.

4.7 Выполняется ли закон сохранения импульса в тех физических явлениях, где имеет место закон изменения энергии?

## Лабораторная работа № 2

### Изучение вращательного движения и определение моментов инерции тел

**Цель и задачи работы:** Изучить основные характеристики вращательного движения. Экспериментально проверить второй закон Ньютона для вращательного движения – зависимость углового ускорения вращающегося тела от момента силы и его момента инерции. Определить момент инерции маятника Обербека при различных моментах силы. Исследовать зависимость момента инерции маятника в зависимости от положения грузиков.

### 1 Общие сведения

Рассмотрим твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси. Его вращение характеризуется углом поворота  $\varphi$ , угловой скоростью  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ , угловым ускорением

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

Мерой инертности вращающегося тела является момент инерции  $J$  (его аналог при поступательном движении – масса  $m$ ). Момент инерции материальной точки на расстоянии  $r$  от оси вращения, вычисляется по формуле  $J = m \cdot r^2$ . Для расчета величины  $J$  твердого тела его надо рассмотреть как систему  $n$  материальных точек (разбить на  $n$  материальных точек) и вычислить момент инерции каждой из них  $J_i = m_i \cdot r_i^2$  и далее сложить:  $J = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2$ .

Воздействие на вращающееся тело некоторой силы  $\vec{F}$ , не проходящей через ось вращения, вызывает изменение кинематических характеристик движения тела  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\varepsilon$ . При этом, как и в случае поступательного движения, угловое ускорение  $\varepsilon$  также пропорционально величине этого воздействия:  $\varepsilon \sim F$ .

Однако в отличие от случая поступательного движения здесь внешнее воздействие зависит не только от величины  $F$ , но и расстояния  $l$  от оси вращения до прямой, вдоль которой действует сила (это расстояние называется плечо силы). При вращательном движении мерой воздействия является момент силы:  $M = F \cdot l$ .

Также выполняется второй закон Ньютона для вращательного движения  $\varepsilon = \frac{M}{J}$  (сравните  $a = \frac{F}{m}$  – второй закон Ньютона для поступательного движения).

### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

В работе используются маятник Обербека, укрепленный на стене (рисунок 1), линейка, штангенциркуль, секундомер.

Особенности вращения твердого тела вокруг неподвижной оси удобно изучать на примере маятника Обербека – устройства, состоящего из крестовины, жестко закрепленной на двойном шкиве с разными радиусами (рисунок 1). На стержнях крестовины симметрично оси вращения закрепляются четыре одинаковых грузика 5. Расстояния от грузиков до оси вращения можно изменять.



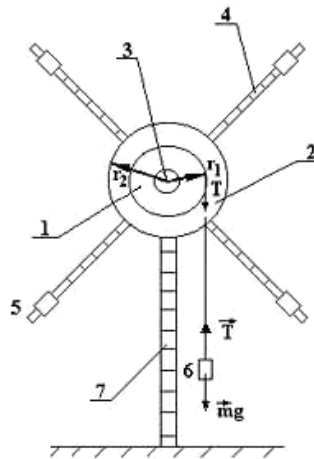


Рисунок 1 Схема маятника Обербека:

1, 2 - двойной шкив с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ ; 3 - ось подшипника;  
4 - стержни с делениями; 5 - грузики; 6 - гиля; 7 - мерная линейка

Поочередно на большой и малый шкивы можно наматывать нить, к концу которой привязана гиля 6 известной массы. Тем самым изменяется момент силы, вызывающий вращательное движение системы. Момент инерции вращающейся системы можно изменять, передвигая грузики 5 на стержнях. Главной измеряемой величиной в данной работе является промежуток времени  $t$ , за который гиля 6 проходит определенный путь  $h$ .

Выведем формулы для расчета момента силы и момента инерции. Выражения закона динамики образуют систему уравнений:

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a; \\ M &= J \cdot \varepsilon. \end{aligned} \quad (1)$$

Первое уравнение относится к поступательному движению гири 6. Результирующая сила  $F$  равна разности сил, действующих на гилю:

$$F = mg - T, \quad (2)$$

где  $T$  – сила натяжения нити.

Из (2) и первого уравнения системы (1)  $T$  выразится как:

$$T = mg - F = m(g - a). \quad (3)$$

Второе уравнение системы (1) относится к вращательному движению маятника, где момент силы  $M$  определяется силой натяжения  $T$  и плечом этой силы  $r$ , равным радиусу того шкива, на который намотана нить:

$$M = T \cdot r = m(g - a)r. \quad (4)$$

В выражении (4) не учитывается момент  $M_{\text{тр}}$  сил трения, действующих в системе. Если им нельзя пренебречь, то результирующий момент примет вид:

$$M = m(g - a)r - M_{\text{тр}}. \quad (5)$$

Чтобы оценить влияние сил трения, можно проделать эксперимент на основе закона сохранения энергии. Задать гире некоторую высоту  $h_1$  и предоставить систему самой себе. Маятник начнет вращаться, при этом гиля опустится, а затем поднимется до высоты  $h_2$ . Если  $h_1 > h_2$ , то произошла потеря потенциальной энергии, затраченная на работу против сил трения. Оценить эту потерю по относительной разнице  $\frac{h_1 - h_2}{2h_1} = \delta$ . Если  $\delta \leq 0,1$  (10%), то моментом сил трения в работе можно пренебречь.

При отсутствии сил трения момент вращающей силы находят по формуле (4). Линейное  $a$  и угловое  $\varepsilon$  ускорения – из кинематических уравнений:

$$h = \frac{at^2}{2}; \quad a = \frac{2h}{t^2}; \quad \varepsilon = \frac{a}{r}. \quad (6)$$

Первое задание выполняется при постоянном моменте инерции, но различных моментах силы  $M_1$  и  $M_2$  (используются различные шкивы – радиусов  $r_1$  и  $r_2$ ). Различны будут угловые

ускорения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Моменты инерции для двух случаев

$$J_1 = \frac{M_1}{\varepsilon_1} \quad \text{и} \quad J_2 = \frac{M_2}{\varepsilon_2}, \quad (7)$$

должны быть равны (в пределах допустимой погрешности), т.к. распределение массы относительно оси вращения не меняется, т.е.  $J_1 = J_2 = J$ , тогда должны быть равны и отношения:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (8)$$

В этом и состоит проверка второго закона Ньютона для вращательного движения.

Для вывода расчетной формулы задания 2 объединим соотношения, описывающие динамику вращательного движения маятника Обербека и поступательного движения гири:

$$J = \frac{M}{\varepsilon}; \quad M = m(g - a)r; \quad \varepsilon = \frac{a}{r}; \quad a = \frac{2h}{t^2}.$$

Получим обобщенную формулу для расчета момента инерции:

$$J = \frac{m \left( g - \frac{2h}{t^2} \right) r^2 \cdot t^2}{2h}, \quad (9)$$

где  $t$  – время движения гири;  $h$  – расстояние, пройденное гирей массой  $m$ ;  $r$  – радиус шкива, на который наматывается нить;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

### 3 Порядок выполнения и требования к оформлению результатов

3.1. Перед занятием необходимо законспектировать следующий теоретический материал: /1/ С.71-79; /2/ С.34-41; /3/ С.131-144, 151-161.

Занести в конспект методику выполнения работы, необходимые таблицы и формулы (разделы 2, 3).

3.2. Снять все 4 грузика со стержней.

3.3. Штангенциркулем измерить диаметры  $d_1$  и  $d_2$  обоих шкивов, затем найти их радиусы:

$$r_1 = \frac{d_1}{2}; \quad r_2 = \frac{d_2}{2}.$$

3.4. Задать  $h$  – определенный отрезок пути, проходимый гирей 6 под действием силы тяжести ( $h = 1 \div 1,5 \text{ м}$ ) и сохранять его при повторных опытах. Значения  $\bar{h}$ ,  $\Delta h$  занести в таблицу 1.

3.5. Намотать нить на шкив меньшего радиуса и точным секундомером определить время  $t_1$  прохождения гирей пути  $h$ . Опыт повторить 3 раза. Все числовые значения записать в таблицу 2.

3.6. Рассчитать среднее арифметическое значение времени  $\bar{t}_1$ .

3.7. Намотать нить на шкив большего радиуса ( $r_2$ ). Прodelать 3 опыта, как это указано в пунктах 3.1.4 – 3.1.5. Найти среднее значение времени  $\bar{t}_2$ . Все значения занести в таблицу 2.

3.8. По формулам (6) рассчитать линейные ускорения  $a_1$  и  $a_2$  и угловые ускорения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Для расчетов использовать только средние значения времени:  $\bar{t}_1$  и  $\bar{t}_2$ .

Таблица 1 Табличные и однократно измеренные величины

Обозначения физических величин	
$g \pm \Delta g, \text{ м/с}^2$	$\bar{h} \pm \Delta h, \text{ м}$
$9,81 \pm 0,005$	

Таблица 2 Экспериментальные и расчетные величины

Обозначения физических величин											
№ п/п		$r, м$	$r, см$	$\omega, рад/с$	$\alpha, м/с^2$	$\varepsilon, рад/с^2$	$M, Н·м$	$J_{0, кг·м^2}$	$\Delta J_{0, кг·м^2}$	$\frac{M_1}{M_2}$	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$
1	Малый шкив	$r_1 =$									
2											
3											
1	Большой шкив	$r_2 =$									
2											
3											
средние значения	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

3.9. Рассчитать момент инерции маятника Обербека по двум моментам силы:

$$J_{01} = \frac{M_1}{\varepsilon_1} \quad \text{и} \quad J_{02} = \frac{M_2}{\varepsilon_2}.$$

3.10. Вычислить среднее значение момента инерции:

$$\bar{J}_0 = \frac{J_{01} + J_{02}}{2}.$$

3.11. Оценить среднюю абсолютную погрешность (экспериментальную)  $\Delta J_{0\text{экс}}$ :

$$\Delta J_{0\text{экс}} = \frac{\Delta J_{01} + \Delta J_{02}}{2}.$$

3.12. Вычислить инструментальную погрешность  $\Delta J_{0\text{инс}}$ . Для этого учесть погрешности штангенциркуля, секундомера, линейки, весов согласно п.3.2.10.

3.13. Окончательный результат представить в виде

$$J_0 = \bar{J}_0 \pm \Delta J_0,$$

где  $\Delta J_0$  – одна из двух погрешностей: экспериментальная  $\Delta J_{0\text{экс}}$  или инструментальная  $\Delta J_{0\text{инс}}$  – выбрать ту, которая больше.

3.1.14. Найти отношения  $\frac{M_1}{M_2}$  и  $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ .

3.15. Сделать выводы.

#### 4 Контрольные вопросы

4.1 Что называется вращательным движением?

4.2 Приведите формулы связи характеристик поступательного и вращательного движений.

4.3 Что такое момент инерции тела? Какова его роль во вращательном движении?

4.4 Что называется моментом силы относительно неподвижной точки? Относительно неподвижной оси? Как определяется направление момента силы?

4.5 Сформулируйте уравнение динамики вращательного движения твердого тела.

4.6 Сопоставьте основные уравнения динамики поступательного и вращательного движений, нет ли в них аналогии?

4.7 Выведите выражение момента силы в данной работе.

4.8 Влияют ли силы трения на движение маятника Обербека, как это проверить?

### Лабораторная работа №3

#### Внутреннее трение в жидкостях. Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей методом Стокса

**Цель и задача работы:** ознакомление с физической природой вязкости жидкостей и газов, определение вязкости жидкости при комнатной температуре.

#### 1 Общие сведения

Всем реальным жидкостям и газам присуща вязкость (внутреннее трение). Движение, возникающее в жидкости или газе после прекращения действия сил, вызывающих его, уменьшается из-за сил внутреннего трения.

Явление вязкости в жидкости и газах можно рассматривать следующим образом. Пусть два слоя жидкости или газа, отстоящие друг от друга на расстоянии  $\Delta x$ , имеют скорости  $v_1$  и  $v_2$ .

Со стороны слоя, который движется быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая его сила.

Наоборот, на «быстрый» слой действует тормозящая сила со стороны «медленного» слоя. Это сила внутреннего трения, направленная по касательной к поверхности слоя. Она тем больше, чем больше площадь соприкасающихся слоев, и зависит от изменения скорости течения жидкости (газа) при переходе от слоя к слою (уравнение Ньютона):

$$F = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta S, \quad (1)$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости (газа),  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\frac{\Delta v}{\Delta x}$  — градиент скорости — изменение скорости отнесенное к расстоянию между слоями в направлении, перпендикулярном скорости,  $\frac{1}{\text{с}}$ ;

$\Delta S$  — площадь соприкосновения слоев,  $\text{м}^2$ .

Если течение жидкостей подчиняется уравнению (1), то вязкость не зависит от градиента скорости, а определяется природой жидкости (газа), температурой и давлением. Вязкость газов при повышении температуры увеличивается, жидкостей — уменьшается. Это указывает на различный механизм их внутреннего трения. Выравнивание скоростей движения соседних слоев газов можно объяснить тем, что из слоя газа, движущегося с большей скоростью, импульс переносится к слою, у которого скорость меньше, и наоборот.

#### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

В состав лабораторной установки входят: прозрачный цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью, набор металлических шариков, микрометр, секундомер.

Согласно закону Стокса, при движении шарика в вязкой жидкости с небольшой скоростью, когда нет вихрей, сила сопротивления равна

$$F_c = 6\pi\eta r v, \quad (2)$$

где  $\eta$  — вязкость жидкости;  $v$  — скорость движения шарика,  $\text{м/с}$ ;  $r$  — радиус шарика,  $\text{м}$ .

На движущийся шарик с плотностью  $\rho$  и объемом  $V$  в жидкости действуют три силы (рисунок 1): сила сопротивления  $F_c$ , сила тяжести  $P = mg$  и выталкивающая (архимедова) сила  $F_A = \rho_0 g \cdot V$ .

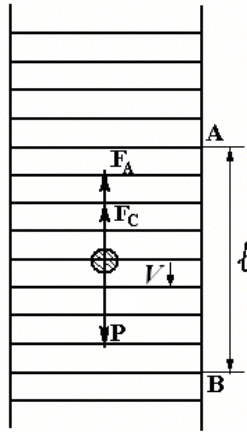


Рисунок 1 Движение шарика в жидкости

Учитывая, что масса  $m = \rho V$ , объем шарика  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ , получаем силу тяжести:

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad (3)$$

и выталкивающую силу:

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  — плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ . Сила тяжести и выталкивающая сила постоянны, сила сопротивления прямо пропорциональна скорости. После опускания шарика в жидкость он движется ускоренно. По мере увеличения скорости увеличивается и сила сопротивления и при определенной скорости  $v$  наступает момент, когда сумма всех действующих сил на шарик равна нулю, и он начинает двигаться равномерно.

В этом случае имеем равенство

$$P = F_A + F_c \quad (5)$$

Подставляя значения сил из формул (2-4) в (5), получаем

$$\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_0 \cdot g + 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

Откуда

$$\eta = \frac{2r^2 \cdot g(\rho - \rho_0)}{9v} \quad (6)$$

Для определения вязкости по методу Стокса используется прозрачный цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью (рисунок 2). На нем имеются две кольцевые метки А и В. Метка А соответствует той высоте, начиная с которой движение шарика становится заведомо равномерным. Нижняя метка В нанесена для удобства отсчета времени.

Опуская шарик в сосуд, отмечают по секундомеру время  $t$  прохождения шариком расстояния  $l$  между метками АВ. Так как  $v = l/t$ , то формула (6) принимает вид:

$$\eta = \frac{d^2 g(\rho - \rho_0) \cdot t}{18l}, \quad (7)$$

где  $d$  - диаметр шарика, м.

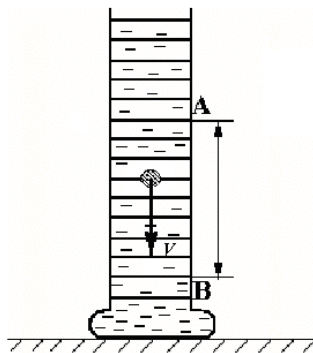


Рисунок 2 Цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: С.153–158, 164–166 /1/; С.175–184, 191–194 /2/; С.95–97 /3/.

3.2 Ознакомиться с установкой и методикой выполнения работы.

3.3 Измерить микрометром диаметр шарика.

3.4 Измерить время прохождения  $t$  шариком расстояния между метками А и В.

3.5 Измерить расстояние  $l$  между метками.

3.6 Вычислить вязкость  $\eta$  по формуле (7).

3.7 Произвести аналогичные измерения и вычисления еще минимум с четырьмя шариками и найти  $\bar{\eta}$  по формуле

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n}{n},$$

где  $n$  - количество измерений.

3.8 Определить абсолютную погрешность для каждого опыта по формуле

$$\Delta\eta_1 = |\bar{\eta} - \eta_1|$$

-----

$$\Delta\eta_n = |\bar{\eta} - \eta_n|.$$

3.9 Вычислить среднеквадратичное отклонение коэффициента вязкости  $\bar{\eta}$

$$S_{\bar{\eta}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\eta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

3.10 По таблицам коэффициентов Стьюдента (приложение А) найти  $t_{p,n}$  для  $n$  и доверительной вероятности  $P=0,997$ .

3.11 Вычислить погрешность  $\Delta\bar{\eta}$  по формуле

$$\Delta\bar{\eta} = S_{\bar{\eta}} \cdot t_{p,n}.$$

3.12 Определить относительную погрешность по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{\eta}}{\bar{\eta}} 100\%.$$

3.13 Результаты измерений и расчетов представить в таблице 1.

Таблица 1 Параметры установки, результаты измерений и вычислений

№, п/п	Обозначения физических величин									
	$\rho$	$\rho_0$	$l, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$\eta$	$\bar{\eta}$	$\Delta\eta$	$\Delta\bar{\eta}$	$\varepsilon$
1										
2										
3										
4										
5										

3.14 Записать окончательный результат в виде

$$\eta = \bar{\eta} \pm \Delta\bar{\eta}.$$

3.15 Сделать выводы.

#### 4 Контрольные вопросы

- 4.1 От чего зависит сила внутреннего трения?
- 4.2 Чем обусловлено внутреннее трение в жидкостях?
- 4.3 Какие силы действуют на шарик, движущийся в жидкости?
- 4.4 В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
- 4.5 Что называется градиентом скорости?
- 4.6 Какое течение называется ламинарным, а какое турбулентным?
- 4.7 Что характеризует число Рейнольдса?
- 4.8 Какими параметрами и как определяется вязкость жидкости?
- 4.9 Какой характер течения жидкости рассматривается в методе Стокса по определению вязкости? Почему?
- 4.10 Охарактеризовать зависимость вязкости жидкости от температуры.
- 4.11 Как связана вязкость с гидродинамической теорией смазки?

## Лабораторная работа № 4

### Изучение гармонических колебаний математического маятника и определение ускорения свободного падения тел

**Цель и задачи работы:** Изучение закономерностей колебательного процесса на примере математического маятника. Применение метода математической статистики для обработки результатов опытов.

#### 1 Общие сведения

Физическим маятником называется твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести вокруг горизонтальной оси подвеса, не проходящей через ее центр масс. Маятник называется математическим, если колеблющееся тело можно представить в виде материальной точки, висящей на невесомой нерастяжимой нити, т.е. в случае, когда размер тела намного меньше длины нити, а массой нити можно пренебречь.

Если амплитуда угловых колебаний  $\varphi_0$  мала (в пределах  $4^\circ \div 5^\circ$ ), то период колебаний математического маятника выражается формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1)$$

#### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Для выполнения работы используются математический маятник с двумя точками подвеса, штатив, секундомер, линейка.

Расчет ускорения свободного падения  $g$  можно произвести по формуле (1) для периода колебаний математического маятника, если удастся измерить с нужной точностью расстояние от оси качания до центра масс шарика. Линейкой это выполнить не всегда возможно, особенно если колеблющееся тело неправильной геометрической формы. Для повышения точности опыта можно взять один и тот же маятник при двух длинах нитей  $l_1$  и  $l_2$ , тогда расстояние до центра масс в первом случае  $l'_1 = l_1 + l_0$ , а во втором  $l'_2 = l_2 + l_0$  (рисунок 1) ( $l_0$  – расстояние от места прикрепления нити до центра масс тела).

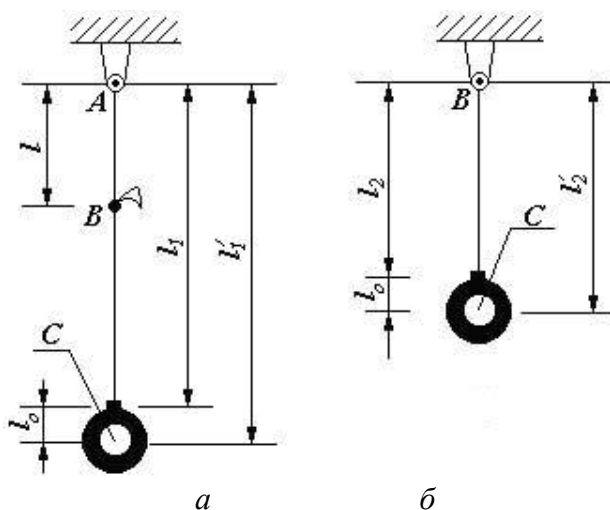


Рисунок 1 Математический маятник: *a* – длинный маятник;  
*б* – короткий маятник



По двум периодам колебаний для длин маятника:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{(l_1 + l_0)}{g}}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{(l_2 + l_0)}{g}}$$

можно рассчитать  $g$ :

$$g = \frac{4\pi^2(l_1 - l_2)}{T_1^2 - T_2^2}. \quad (2),$$

В формуле (2) отсутствует трудно определяемое расстояние  $l_0$ , в то время как расстояние  $l = l_1 - l_2 = AB$  (рисунок 1) можно легко измерить линейкой. Итак, рабочая формула данной лабораторной работы имеет вид:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T_1^2 - T_2^2}. \quad (3)$$

Так как опыты проводятся несколько раз, то за периоды колебаний следует брать средние арифметические, т.е.  $\overline{T_1}$  и  $\overline{T_2}$ .

### 3 Порядок выполнения и требования к оформлению результатов

3.1 Перед занятием необходимо законспектировать следующий теоретический материал: /1/ С.88-91, 96-99; /2/ С.255-261; /3/ С.181-185, 190-197.

Занести в конспект методику выполнения работы, необходимые таблицы и формулы (разделы 2, 3).

3.2 Определить  $t_1$  – время  $z = 10$  колебаний для длинного маятника с длиной подвеса  $l_1$  (колебания малой амплитуды  $\varphi \approx 4 \div 5^\circ$ ).

Рассчитать период колебаний  $T_1 = \frac{t_1}{z}$ . Записать результаты в таблицу 2.

3.3 Повторить этот опыт  $n = 7$  раз.

Таблица 1 Табличные и однократно измеренные величины

Обозначения физических величин	
$\pi \pm \Delta\pi$	$\overline{l} \pm \Delta l, \text{ м}$
$3,14 \pm 0,005$	

Таблица 2 Экспериментальные и расчетные величины

Обозначения физических величин									
№ п/п	Длинный маятник				Короткий маятник				$\overline{g}$ $\Delta g$
	$t_1$	$T_{1i}$	$\Delta T_{1i}$	$(\Delta T_{1i})^2$	$t_2$	$T_{2i}$	$\Delta T_{2i}$	$(\Delta T_{2i})^2$	
1									
2									
3									
·								·	
·								·	
·								·	
7									
средние значения	—			$\sum_{i=1}^7 (\Delta T_{1i})^2$	—			$\sum_{i=1}^7 (\Delta T_{2i})^2$	— —

3.4 Определить время  $t_2$   $z = 10$  для короткого маятника с длиной подвеса  $l_2$ . Переход к меньшей длине осуществляется переносом петли на нити на верхний штырек штатива.

Рассчитать период колебаний  $T_2 = \frac{t_2}{z}$ . Опыт повторить также  $n = 7$  раз и записать результаты в таблицу 2.

3.5 Рассчитать средние значения периодов:

$$\overline{T}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{1i}; \quad \overline{T}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{2i}.$$

3.6 Найти ускорение свободного падения по формуле:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{\overline{T}_1^2 - \overline{T}_2^2}, \quad (4)$$

где  $l = AB$  (рисунок 1) измеряется один раз линейкой. Результат записать в таблицу 1.

3.7 Рассчитать все величины, указанные в таблице:

абсолютные погрешности периодов для всех  $n = 7$  опытов:

$$\Delta T_{1i} = | \overline{T}_1 - T_{1i} |; \quad \Delta T_{2i} = | \overline{T}_2 - T_{2i} |.$$

Найти квадраты этих погрешностей  $(\Delta T_{1i})^2$  и  $(\Delta T_{2i})^2$ ;

Найти суммы квадратов:  $\sum_{i=1}^n (\Delta T_{1i})^2$  и  $\sum_{i=1}^n (\Delta T_{2i})^2$ ;

3.8 Рассчитать среднеквадратические отклонения:

$$S_{\overline{T}_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{1i})^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad S_{\overline{T}_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{2i})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (5)$$

По таблице коэффициентов Стьюдента из Приложения А найти  $t_{p,n}$  для  $n=7$  и выбранной доверительной вероятности, например  $p=0,95$ .

Определить доверительные интервалы для двух периодов:

$$\Delta T_1 = S_{\overline{T}_1} \cdot t_{p,n}; \quad \Delta T_2 = S_{\overline{T}_2} \cdot t_{p,n}. \quad (6)$$

3.9 Сравнить найденные доверительные интервалы (окончательные абсолютные погрешности)  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  с инструментальной погрешностью  $\Delta T_{инс}$ , связанной с погрешностью секундомера, и ту из них, которая больше, взять для расчета погрешности  $\Delta g$  по формуле (7).

Имея в виду, что  $T = \frac{t}{z}$ , относительная погрешность будет  $\frac{\Delta T_{инс}}{T} = \frac{\Delta t_{инс}}{t} + \frac{\Delta z}{z}$ . А так как  $\Delta z=0$ , то

$$\Delta T_{инс} = T \frac{\Delta t_{инс}}{t} = \frac{\Delta t_{инс}}{z}.$$

(для секундомера  $\Delta t_{инс} = c / 2$ ,  $c$  – цена деления).

3.10 Вывести формулу относительной погрешности по следующей методике:

а) вначале логарифмируем исходную формулу (4)

$$\ln g = \ln 4 + 2 \ln \pi + \ln l - \ln(T_1 - T_2) - \ln(T_1 + T_2),$$

б) далее производим дифференцирование:

$$\frac{dg}{g} = \frac{2d\pi}{\pi} + \frac{dl}{l} - \frac{dT_1 - dT_2}{T_1 - T_2} - \frac{dT_1 + dT_2}{T_1 + T_2},$$

в) в полученном выражении заменяем знаки дифференциалов  $d$  на знаки конечных приращений  $\Delta$ :  $d \rightarrow \Delta$ ; заменяем  $(-) \rightarrow (+)$ , и по правилам статистики берем сумму квадратов слагаемых. Окончательный вид формулы относительной погрешности:

$$\varepsilon_g = \sqrt{4 \left( \frac{\Delta \pi}{\pi} \right)^2 + \left( \frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \frac{(\Delta T_1 + \Delta T_2)^2}{(\overline{T}_1 - \overline{T}_2)^2} + \frac{(\Delta T_1 + \Delta T_2)^2}{(\overline{T}_1 + \overline{T}_2)^2}}. \quad (7)$$

В этом выражении  $\Delta l$  – погрешность, равная инструментальной погрешности линейки,  $\Delta \pi$  – половина единицы последнего разряда числа  $\pi$  (если  $\pi=3,14$ , то  $\Delta \pi=0,005$ ).

### 3.11 Рассчитать абсолютную погрешность (доверительный интервал)

$$\Delta g = \bar{g} \cdot \varepsilon_g$$

и округлить по правилам округления до первой значащей цифры, а  $g$  округлить в соответствии с  $\Delta g$  и окончательно записать в выводах в виде:

$$g = (\bar{g} \pm \Delta g) \text{ м/с}^2.$$

## 4 Контрольные вопросы

4.1 Что называется математическим маятником?

4.2 Зависит ли амплитуда колебаний от массы и длины маятника?

4.3 Зависит ли период математического маятника от массы и длины маятника?

4.4 Записать выражение для потенциальной и кинетической энергии математического маятника.

4.5 Чем отличается математический маятник от физического?

4.6 Сколько нужно сделать опытов, чтобы доверительный интервал стал равным инструментальной погрешности секундомера?

4.7 Будет ли частота колебаний математического маятника зависеть от местонахождения его на поверхности Земли (на полюсе или на экваторе)?

4.8 Что лучше предпринять, чтобы повысить в 2 раза точность определения  $g$ :

- а) увеличить длину нити в 2 раза при количестве колебаний  $z=10$ ;
- б) при той же длине нити увеличить количество колебаний в 2 раза, т.е.  $z=20$  ?

## Лабораторная работа № 5

### Изучение свободных колебаний пружинного маятника

**Цель и задачи работы:** Ознакомление с видами механических колебаний. Получение представления о параметрах, характеризующих колебательное движение. Изучение зависимости периода колебаний пружинного маятника от массы груза. Определение коэффициента жесткости пружины, коэффициента сопротивления воздуха.

#### 1 Общие сведения

Рассмотрим пружинный маятник - систему, состоящую из груза массы  $m$ , подвешенного на невесомой упругой пружине (рисунок 1).

Будем характеризовать смещение груза из положения равновесия координатой  $x$ , причем ось направим по вертикали вниз. Если подвесить на пружине (рисунок 1а) груз весом  $P = m \cdot g$ , то нижний конец её сместится на величину  $x_{\text{ст}}$ , называемую статическим смещением (рисунок 1б). В этом положении статического равновесия сила тяжести будет уравниваться упругой силой по закону Гука  $F_0 = -k \cdot x_{\text{ст}}$ . Здесь  $k$  – коэффициент пропорциональности, называемый жесткостью пружины.

Если сообщить грузу смещение  $A$  и предоставить систему самой себе, то под действием упругой силы груз будет двигаться к положению равновесия. При этом потенциальная энергия системы убывает, одновременно скорость груза, и, следовательно, кинетическая энергия системы увеличивается. Пройдя положение статического равновесия, движение груза начинает замедляться. При этом потенциальная энергия системы увеличивается за счет кинетической энергии. Движение прекращается в тот момент времени, когда кинетическая энергия полностью превратится в потенциальную, т.е. когда смещение груза станет равным  $-A$ . Если в системе отсутствует сопротивление среды, то полная энергия системы будет оставаться постоянной и груз будет колебаться в пределах от  $x = A$  до  $x = -A$  неограниченно долго. Уравнение второго закона Ньютона для этого случая записывается в виде:

$$m \cdot \ddot{x} = -k \cdot x, \quad (1)$$

здесь ускорение  $a = \ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$ .

Введем обозначение:

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2, \quad (2)$$

с учетом этого приведем (1) к виду:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) является дифференциальным уравнением свободных гармонических колебаний. Решение уравнения (3) имеет вид:

$$x = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Таким образом, под действием возвращающей силы вида  $F = -k \cdot x$  груз совершает гармонические колебания.

## 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Для выполнения работы используются пружинный маятник, закрепленный на штативе, набор грузиков, секундомер, мерная линейка.

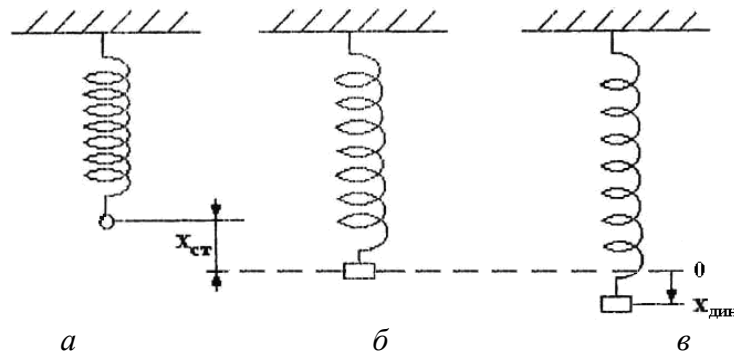


Рисунок 1 Положения пружинного маятника: а – без грузика; б – с грузиком в отсутствии колебаний; в – при смещении  $x$  грузика от положения равновесия в процессе колебаний

Зависимость периода колебаний  $T$  от параметров пружинного маятника:  $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

Отсюда жесткость пружины выразится как:

$$k = 4\pi^2 \frac{m}{T^2}. \quad (4)$$

В реальных колебательных системах всегда часть энергии расходуется на работу по преодолению сил трения (например, силы сопротивления воздуха, сил внутреннего трения и т.д.). При этом амплитуда колебаний  $A$  уменьшается со временем до нуля. Такие колебания называются затухающими.

При рассмотрении колебания в среде (в том числе и в воздухе), обладающей вязкостью, необходимо учесть силу сопротивления среды, значение которой прямо пропорционально скорости:

$$F_{мп} = -r \cdot v = -r \cdot \dot{x}, \quad (5)$$

где  $r$  называется коэффициентом сопротивления среды;  $v = \dot{x} = \frac{dx}{dt}$  – скорость колеблющегося тела.

В этом случае второй закон Ньютона принимает вид:

$$m \cdot \ddot{x} = -k \cdot x - r \cdot \dot{x}. \quad (6)$$

Перепишем (6), обозначив  $r/m = 2\beta$  и  $k/m = \omega_0^2$ :

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (7)$$

где  $\beta$  называется коэффициентом затухания.

Формула (7) является дифференциальным уравнением затухающих колебаний. При его решении можно рассмотреть 2 случая.

1) Случай малых затуханий  $\beta \ll \omega_0$ .

Потери энергии в системе малы. Решение имеет вид

$$x = A_0 \cdot \exp(-\beta \cdot t) \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

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

Тогда период колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (9)$$

увеличивается по сравнению с периодом незатухающих колебаний. Из выражения (8) следует, что амплитуда колебаний определяется следующим образом:

$$A(t) = A_0 \cdot \exp(-\beta \cdot t), \quad (10)$$

т.е. со временем она убывает. Величина  $\tau = 1 / \beta$  называется временем релаксации – это время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e \approx 2,72$  раз.

Изменение амплитуды колебаний во времени при не очень больших затуханиях показано на рисунке 2а, где пунктирные линии изображают функцию (10).

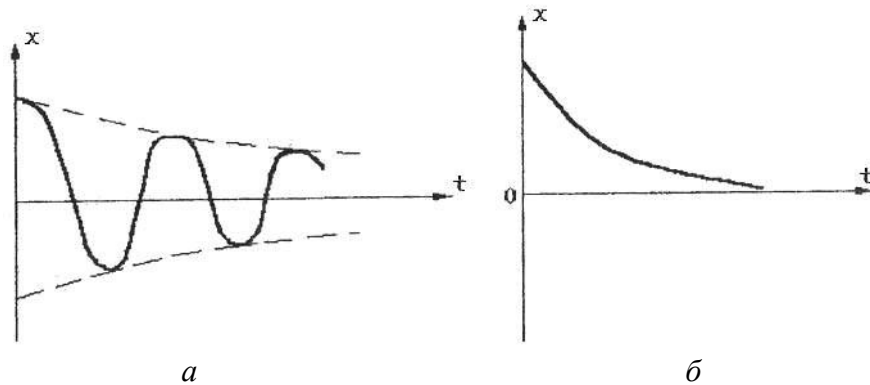


Рисунок 2 Зависимость смещения от времени: а – случай малых затуханий  $\beta \ll \omega_0$ ; б – аperiodический режим  $\beta > \omega_0$

Из закона убывания амплитуд (10) следует, что отношение любых двух амплитуд, отстоящих друг от друга на один период, есть величина постоянная:  $A(t)/A(t+T) = \text{const} = \delta$ .

Величину  $\delta$  называют декрементом затухания. Часто пользуются также понятием логарифмический декремент затухания  $\lambda = \ln \delta$ , который, как можно показать подстановкой  $\delta$  в (10) равен  $\beta \cdot T$ . Отсюда  $\beta = \lambda/T$ .

2) Случай  $\beta > \omega_0$ .

Потери энергии в системе велики. В этом случае в уравнении (7) третий член перестает играть существенную роль, и решение описывает аperiodический режим движения (рисунок 2б).

Соппротивление среды, при котором колебания прекращаются, называется критическим.

Оно находится из условия  $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \infty$ , или  $\beta = \omega_0$ :  $r_{kp} = 2\beta \cdot m = 2 \cdot \sqrt{m \cdot k}$ .

### 3 Порядок выполнения и требования к оформлению результатов

Перед занятием необходимо законспектировать следующий теоретический материал:

/2/ С.26, 255-261, 267-230; /3/ С.181-185, 190-197.

Занести в конспект методику выполнения работы, необходимые таблицы и формулы (разделы 2, 3).

#### 3.1 Задание 1 Определение жесткости пружины статическим методом

3.1.1 Подвесить на пружину груз известной массы и с помощью линейки определить статистическое смещение  $x_{ст}$  груза ( $x_{ст} = l - l_0$ , где  $l_0$  – длина нерастянутой пружины,  $l$  – длина нагруженной пружины). Данные занести в таблицу 1.

3.1.2 То же самое проделать еще для двух грузов различной массы.

Таблица 1 Экспериментальные и расчетные величины

Обозначения физических величин				
$m, \text{ кг}$	$x_{\text{ст}}, \text{ м}$	$k_i, \text{ Н/м}$	$\Delta k_i, \text{ Н/м}$	$(\Delta k_i)^2, (\text{Н/м})^2$
средние значения	—			$\sum_{i=1}^n (\Delta k_i)^2$

3.1.3 По удлинению  $x_{\text{ст}}$  под действием соответствующей нагрузки  $P = m \cdot g$  определить жесткость:  $k_i = \frac{P}{x_{\text{ст}}} = \frac{m \cdot g}{x_{\text{ст}}}$ .

3.2.5 Найти среднее значение  $\bar{k}_{\text{ст}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$ , где  $n = 3$  – количество опытов; абсолютные погрешности каждого измерения  $\Delta k_i = |\bar{k} - k_i|$ ; квадраты этих погрешностей  $(\Delta k_i)^2$ . Вычислить сумму квадратов  $\sum_{i=1}^n (\Delta k_i)^2$ . Результаты занести в таблицу.

3.2.6 Рассчитать среднеквадратическое отклонение:

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta k_i)^2}{n(n-1)}}.$$

По таблице коэффициентов Стьюдента из Приложения А найти  $t_{p,n}$  для  $n=3$  и выбранной доверительной вероятности, например  $p=0,95$ .

Найти доверительный интервал  $\Delta k_{\text{ст}} = S_k \cdot t_{p,n}$

3.2.7 Конечный результат представить в виде:  $k_{\text{ст}} = \bar{k}_{\text{ст}} \pm \Delta k_{\text{ст}}$ .

## 3.2 Задание 2 Определение жесткости пружины динамическим методом

3.2.1 Подвесить на пружине грузик известной массы и, слегка, на  $3 \div 5 \text{ см}$ , приподняв его, отпустить. По секундомеру определить время двадцати колебаний ( $z = 20$ ). Данные занести в таблицу 2. Измерения с данной массой повторить  $n = 3$  раза.

3.2.2 Первый пункт повторить еще два раза с грузами различной массы.

3.2.3 Усреднить значения  $t$  для каждой массы. Используя полученные величины  $\bar{t}$ , определить периоды колебаний пружины с соответствующим грузом  $\bar{T} = \bar{t} / z$ . Вычислить квадраты периодов  $\bar{T}^2$ .

3.2.4 По значениям  $m$  и  $\bar{T}^2$  найти  $k_i$  исходя из выражения (4).

3.2.5 Найти среднее значение  $\bar{k}_{\text{дин}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$ , где  $n = 3$  – количество опытов; абсолютные погрешности каждого измерения  $\Delta k_i = |\bar{k} - k_i|$ ; квадраты этих погрешностей  $(\Delta k_i)^2$ . Вычислить сумму квадратов  $\sum_{i=1}^n (\Delta k_i)^2$ . Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2 Экспериментальные и расчетные величины

Обозначения физических величин							
$m, \text{кг}$	$t, \text{с}$	$\bar{t}, \text{с}$	$\overline{T}, \text{с}$	$\overline{T}^2, \text{с}^2$	$k_i, \text{Н/м}$	$\Delta k_i, \text{Н/м}$	$(\Delta k_i)^2, (\text{Н/м})^2$
средние значения	—	—	—	—			$\sum_{i=1}^n (\Delta k_i)^2$

3.2.6 Рассчитать среднеквадратическое отклонение:

$$S_{\bar{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta k_i)^2}{n(n-1)}}.$$

По таблице коэффициентов Стьюдента из Приложения А найти  $t_{p,n}$  для  $n=3$  и выбранной доверительной вероятности, например  $p=0,95$ .

Найти доверительный интервал  $\Delta k_{\text{дин}} = S_{\bar{k}} \cdot t_{p,n}$

3.2.7 Используя данные таблицы 2, построить график функции  $T^2(m)$  и объяснить полученную зависимость. При построении графика следует включить и точку в начале координат.

3.2.8 Полученное значение  $k_{\text{дин}} = \bar{k}_{\text{дин}} \pm \Delta k_{\text{дин}}$  сравнить с жесткостью пружины, найденной статическим методом.

## 4 Контрольные вопросы

4.1 Какие колебания называются собственными (или по-другому свободными), вынужденными, затухающими, незатухающими, периодическими, гармоническими?

4.2 Что называется амплитудой, частотой, периодом и фазой колебаний?

4.3 Как вычислить скорость, ускорение гармонически колеблющейся точки?

4.4 Как получить дифференциальное уравнение гармонических колебаний?

4.5 Какие факторы могут привести к различиям значений коэффициентов жесткости, полученных статическим и динамическим методами?

4.6 От чего зависит жесткость пружины?

4.7 Чему равен период колебаний пружинного маятника в отсутствии затухания?

4.8 Почему график зависимости  $T^2(m)$  должен проходить через начало координат?

4.9 Как вычислить кинетическую, потенциальную и полную энергии колеблющейся точки?

4.10 Как влияет наличие затухания на период колебаний?

4.11 Являются ли колебания, совершаемые по закону (8): 1) гармоническими, 2) периодическими? Почему?



## Лабораторная работа № 6

### Определение влажности воздуха

**Цель и задача работы:** освоить метод измерения влажности воздуха, измерить абсолютную и относительную влажность воздуха в лаборатории.

#### 1 Общие сведения

Для количественной оценки влажности воздуха используют абсолютную и относительную влажность. Абсолютной влажностью воздуха  $\rho_a$  называется масса водяных паров, содержащихся в  $1\text{ м}^3$  воздуха при данных условиях. Значение  $\rho_a$  оценивается по плотности водяного пара в воздухе. Обычно на практике ее выражают в  $\text{г/м}^3$ :

$$\rho_a = \rho_{\text{пар}} \left( \frac{\rho}{\rho_{\text{возд}}} \right)$$

Абсолютная влажность оценивается также по давлению (упругости) водяного пара  $P_a$ , выраженному в миллиметрах ртутного столба (*мм. рт. ст.*):  $1\text{ мм. рт. ст.} = 133\text{ Па}$ .

Связь между давлением и плотностью следует из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$P_a = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu}$$

При комнатных температурах численные значения давления водяного пара в *мм. рт. ст.* примерно равны значениям плотности в  $\text{г/м}^3$  (приложение А).

Для характеристики степени влажности водяного пара недостаточно знать его абсолютную влажность, т.е. его плотность, так как воздух, имеющий одну и ту же абсолютную влажность  $\rho_a$ , при высокой температуре будет сухим, а при низкой - сырым. Например, в летний полдень воздух на морском побережье является сухим, так как температура его высока, а ночью он становится сырым, так как его температура упала, хотя количество водяного пара в  $1\text{ м}^3$  воздуха, т.е. его абсолютная влажность не изменилась.

Поэтому для более ясного представления о степени влажности воздуха вводят понятие относительной влажности  $B$ . Относительной влажностью воздуха  $B$  называется отношение абсолютной влажности к тому количеству водяного пара, которое необходимо для насыщения  $1\text{ м}^3$  воздуха при данной температуре, выраженное в %.

Относительную влажность аналогично абсолютной можно определить и по давлению паров. Она измеряется числом, показывающим, сколько процентов составляет давление водяных паров, находящихся в воздухе  $P_a$  от давления насыщающих водяных паров  $P_n$  при такой же температуре:

$$B = \frac{P_a}{P_n} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad B = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\% \quad (1)$$

Таким образом, относительная влажность зависит не только от абсолютной влажности, но и от температуры воздуха. При вычислении относительной влажности необходимо пользоваться таблицами и значениями  $\rho_n$  или  $P_n$  (приложение А).

#### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Для выполнения лабораторной работы используется гигрометр психрометрический типа ВИТ. Он состоит из двух одинаковых термометров (рисунок 1). Метод измерения относительной влажности на нем основан на зависимости между влажностью воздуха и психрометрической разностью – разностью показаний «сухого» и «увлажненного» термометров, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Сняв показания термометров и введя поправки в их показания, определяют разность показаний термометров. Затем по показанию «сухого» и «увлажненного» термометров определяют относительную влажность воздуха по психрометрической таблице (пример определения относительной влажности приведен в

приложении В). Если при  $p = \text{const}$  снижается температура воздуха, относительная влажность увеличивается. Для данного значения абсолютной влажности существует такая температура, ниже которой часть паров воды будет конденсироваться. В атмосфере при этом образуется туман или выпадает роса. Температура, при которой воздух в процессе своего охлаждения становится насыщенным водяными парами, называется точкой росы. Отметим, что при известной точке росы абсолютную влажность воздуха  $\rho_a$  можно найти по приложению Б, так как она равна плотности насыщающего пара  $\rho_n$  при точке росы. Определив затем по этой таблице  $\rho_n$  для данной температуры воздуха, можно по формуле (1) вычислить относительную влажность  $B$ .

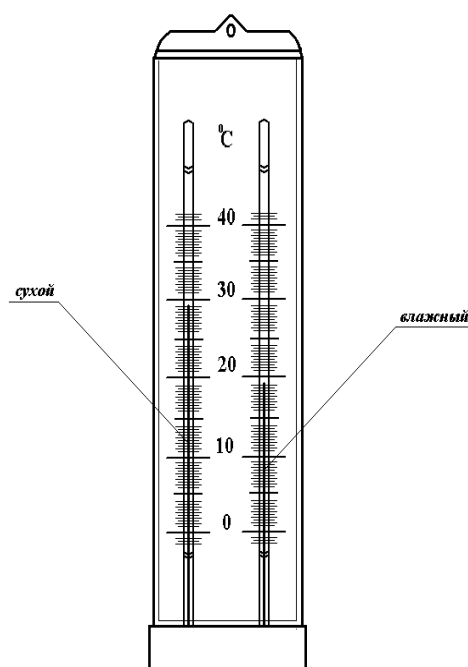


Рисунок 1 Гигрометр психрометрический типа ВИТ

При отсутствии центров конденсации пар может стать пересыщенным. Поэтому чистый воздух может охладиться ниже точки росы, а находящийся в нем пар конденсироваться не будет.

Выясним, как изменение температуры воздуха может отражаться на его влажности.

Пусть абсолютная влажность воздуха  $\rho_a = 0,0094 \text{ кг/м}^3$  при  $22^\circ\text{C}$ . Так как при  $22^\circ\text{C}$  плотность насыщающего водяного пара  $\rho_n = 0,01914 \text{ кг/м}^3$ , то относительная влажность  $B$  составляет около 50%.

Допустим теперь, что температура воздуха упадет до  $10^\circ\text{C}$ , а плотность останется прежней. Тогда относительная влажность воздуха будет 100%, т.е. воздух окажется насыщенным водяными парами. Если же температура понизится до  $6^\circ\text{C}$  (например, ночью), то из каждого кубического метра воздуха сконденсируется  $0,01914 - 0,0073 = 0,01184 \text{ (кг)}$  водяного пара (выпадет роса).

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результата

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 203–205, 213–221; /2/ С. 155–168, 170–174; /3/ С. 141–146.

3.2 Предварительно ознакомившись с конструкцией психрометра, осторожно снять его с подвески и убедиться в работоспособности.

3.3 Заполнить шприц водой и с его помощью обильно смочить батиновый наконечник

термометра.

3.4 Когда температура влажного термометра перестанет снижаться, записать показания сухого  $t_c$  и влажного  $t_b$  термометров с точностью до  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Данные занести в таблицу 1. К этим показаниям термометров добавить поправки, приведенные в паспорте гигрометра (см. таблицу В1 в приложении В). Поправки вводятся путем алгебраического сложения. Вычислить разность температур по «сухому» и «увлажненному» термометрам.

3.5 Определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице, приведенной на корпусе гигрометра. Искомая влажность будет на пересечении строк температуры по «сухому» термометру и разности температур  $t_c - t_b$ . При отсутствии в таблице показания «сухого» термометра и разности температур  $t_c - t_b$  для определения влажности применить метод интерполирования (см. таблицы Б2-Б4 в приложении Б). Найденное значение относительной влажности записать в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

Термометры	$t, ^{\circ}\text{C}$	Поправки, $^{\circ}\text{C}$	Температура с учетом поправок, $^{\circ}\text{C}$	Разность температур, $t_c - t_b, ^{\circ}\text{C}$	$B, \%$	$P_{\text{в}},$ мм. рт. ст.	$P_{\text{а}},$ мм. рт. ст.
1	2	3	4	5	6	7	8
«сухой»							
«увлажненный»							

3.6 По таблице А1 упругости насыщенного пара (приложение А) определить давление насыщенного пара  $p_n$  при температуре  $t_c$ .

3.7 По формуле (1) вычислить абсолютную влажность  $p_a$ .

3.8 Определить при какой температуре, соответствующей данным таблицы 1, начнется выпадение росы.

3.9 Имея в виду, что абсолютная влажность в мм. рт. ст. приблизительно равна влажности в граммах воды на  $1 \text{ м}^3$ , и используя данные таблицы 1, определить, сколько выпадет влаги в виде росы при снижении температуры в лаборатории до  $5^{\circ}\text{C}$ .

3.10 Вычислить насколько уменьшится относительная влажность в лаборатории, если температура повысится на  $10^{\circ}\text{C}$ , т.е. станет равной  $30^{\circ}\text{C}$ .

## 4 Контрольные вопросы

4.1 Охарактеризовать понятия «агрегатное состояние» и «фазовое состояние».

4.2 Что называется парообразованием, конденсацией, испарением?

4.3 От каких величин зависит скорость испарения?

4.4 Как объяснить понижение температуры жидкости при её испарении?

4.5 Что такое сублимация или возгонка? Приведите примеры веществ, способных возгоняться.

4.6 Чем отличается процесс парообразования в закрытом сосуде от аналогичного процесса в открытом?

4.7 Какие пары называют насыщенными?

4.8 Что называют точкой росы?

4.9 Что такое абсолютная и относительная влажность?

4.10 Каковы субъективные ощущения влажности воздуха человеком?

4.11 Что такое дефицит влажности воздуха?

4.12 Почему роса выпадает ночью?

Приложение А  
Таблица А1 Давление и плотность насыщенных водяных паров  
при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{мм. рт. ст.}$	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{мм. рт. ст.}$	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{мм. рт. ст.}$	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$
-10	1,95	2,14	11,5	10,1	10,23	21,0	18,5	18,13
-5	3,01	3,24	12,0	10,4	10,51	21,5	19,0	18,59
-4	3,28	3,51	12,5	10,8	10,90	22,0	19,6	19,14
-3	3,57	3,81	13,0	11,1	11,18	22,5	20,2	19,69
-2	3,88	4,13	13,5	11,5	11,56	23,0	20,9	20,34
-1	4,23	4,47	14,0	11,9	11,95	23,5	21,5	20,89
0	4,61	4,80	14,5	12,3	12,33	24,0	22,2	21,53
1	4,91	5,20	15,0	12,7	12,70	24,5	22,8	22,08
2	5,31	5,60	15,5	13,1	13,08	25,0	23,5	22,72
3	5,71	6,00	16,0	13,5	13,46	25,5	24,2	23,36
4	6,11	6,40	16,5	14,0	13,93	26,0	25,0	24,09
5	6,62	6,80	17,0	14,4	14,30	26,5	25,7	24,72
6	7,01	7,30	17,5	14,7	14,58	27,0	26,5	25,45
7	7,52	7,80	18,0	14,9	14,75	27,5	27,3	26,17
8	8,01	8,30	18,5	15,6	15,42	28,0	28,1	26,89
9	8,61	8,80	19,0	16,3	16,08	28,5	28,9	27,61
10,0	9,1	9,60	19,5	16,8	16,55	29,0	29,7	28,33
10,5	9,5	9,65	20,0	17,4	17,11	30	31,8	30,3
11,0	9,8	9,94	20,5	17,9	17,57		7	

Приложение Б

Пример определения относительной влажности интерполированием.

а) Определяем температуры по «сухому» и «увлажненному» термометрам и разность между этими температурами.

Таблица Б1 Определение температуры по «сухому» и «увлажненному» термометрам

Термометры	Измеренные температуры, $^{\circ}\text{C}$	Поправки к термометрам по паспорту, $^{\circ}\text{C}$	Температуры после введения поправок, $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4
«сухой» «увлажненный»	$t_c = 22,5$ $t_e = 16,1$	-0,15 +0,20	22,35 16,3

Принимаем  $t_c = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , разность температуры ( $t_c - t_g$ ) равна:  $22,4 - 16,3 = 6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Определяем относительную влажность для  $t_c = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для чего интерполируем значения относительной влажности по таблице для  $t_c$  от 22 до  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_c - t_g = 6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица Б2 Приближенное определение относительной влажности

$t_c$ по таблице, $^{\circ}\text{C}$	Разность $t_c - t_g$ по таблице, $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность, %
1	2	3
22	6,0	48
23	6,0	50

При увеличении  $t_c$  на  $1^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность увеличивается на 2%, поэтому, увеличение  $t_c$  на  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличит относительную влажность на

$$\frac{0,4 \cdot 2\%}{1} = 0,8\%.$$

Для  $t_c = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_c - t_g = 6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность равна  $48 + 0,8 = 48,8\% \approx 49\%$ .

в) Определяем относительную влажность для  $t_c = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и

$t_c - t_g = 6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для чего интерполируем значения относительной влажности по таблице для  $t_c$  от 22 до 23 и  $t_c - t_g = 6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица Б3 Определение относительной влажности  
интерполированием

$t_c$ по таблице, $^{\circ}\text{C}$	Разность $t_c - t_g$ по таблице, $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность, %
1	2	3
22	6,5	44
23	6,5	46

Для  $t_c = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_c - t_g = 6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность по расчету, аналогичному для (б), равна  $44,8\% \approx 45\%$ .

г) Определяем относительную влажность для  $22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и

$t_c - t_g = 6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для чего интерполируем найденные значения относительной влажности для  $t_c - t_g$  от 6,0 до  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $t_c = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица Б4 Окончательное определение относительной  
влажности

$t_c$ по таблице, $^{\circ}\text{C}$	Разность $t_c - t_g$ по таблице, $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность, %
1	2	3
22,4	6,0	49
22,4	6,5	45

При увеличении разности  $t_c - t_g$  на  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительная влажность уменьшается на 4,0%, поэтому увеличение  $t_c - t_g$  на  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  уменьшит относительную влажность на  $\frac{0,1 \cdot 4,0}{0,5} = 0,8\%$

$$49,0 - 0,8 = 48,2\% \approx 48\%$$

## Лабораторная работа №7

### Газовые процессы и определение адиабатической постоянной

**Цель и задача работы:** изучение адиабатического процесса и определение показателя адиабаты для воздуха.

#### 1 Общие сведения

Адиабатическим процессом называется изменение состояния термодинамической системы, протекающее без теплообмена ее с окружающей средой. Примером термодинамической системы может служить газ, заключенный в цилиндр под поршнем. В этом случае процессы сжатия и расширения газа в цилиндре можно рассматривать как адиабатические при условии его абсолютной теплоизоляции. Но так как в природе нет абсолютных теплоизоляторов, то реальные процессы могут быть только близкими к адиабатическим.

Адиабатический процесс подчиняется уравнению Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{const.} \quad (1)$$

График процесса называется адиабатой, а величина  $\gamma$  - показателем адиабаты. Величина  $\gamma$  численно равна отношению теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (2)$$

В формуле (2) используются так называемые молярные теплоемкости, которые измеряются количеством теплоты, необходимым для нагревания одного моля газа на 1 К.

Молярная теплоемкость при постоянном давлении  $C_p$  всегда больше, чем молярная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v$ , так как для нагревания газа в изобарическом процессе подводимая теплота идет не только на повышение внутренней энергии газа, но и на совершение работы при расширении. Для 1 моля идеального газа:

$$\tilde{N}_\delta = \tilde{N}_v + R.$$

Молярные теплоемкости могут быть выражены через число степеней свободы  $i$  молекулы газа:

$$C_p = \frac{i+2}{2}R; \quad C_v = \frac{1}{2}iR, \quad (3)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Числом степеней свободы тела называется число независимых координат, определяющих положение тела (атомов или молекул) в пространстве. Число степеней свободы зависит от температуры. Это можно объяснить, предположив, что при низких температурах наблюдается только поступательное движение молекул, при комнатных - добавляется их вращение, а при высоких – к этим двум видам движения добавляются еще колебания молекул. При комнатной температуре для одноатомных молекул газа  $i = 3$ ; для двухатомных молекул  $i = 5$ ; для трех- и многоатомных молекул  $i = 6$ .

Подставляя эти значения величин в формулу (2), получим

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (4)$$

#### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Установка, с помощью которой определяют отношение теплоемкостей воздуха по методу адиабатического расширения (Клемана-Дезорма), изображена на рисунке 1.

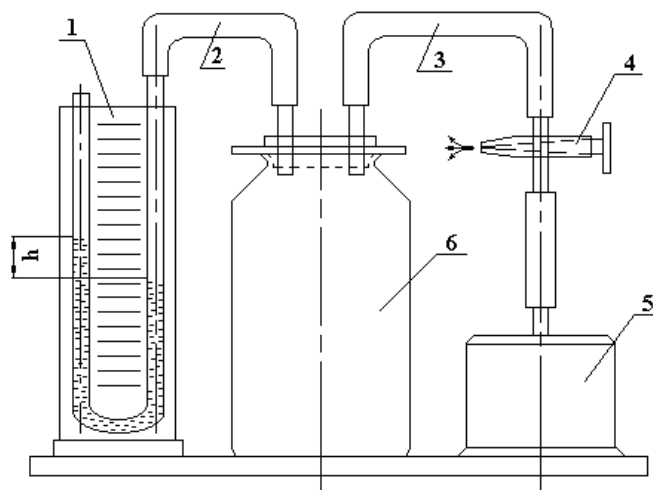


Рисунок 1 Схема лабораторной установки: 1 – манометр жидкостной; 2 и 3 - соединительные шланги; 4 – кран; 5- пневматический насос; 6 – баллон

Установка представляет собой баллон 6, соединенный трубкой 2 с водяным манометром 1. Кран 4 служит для соединения сосуда с насосом 5. С помощью насоса будем накачивать в сосуд воздух до тех пор, пока жидкость в правом колене манометра не достигнет некоторого значения шкалы.

При сжатии воздуха его температура сначала повысится, а через некоторое время, благодаря теплообмену с внешней средой, воздух в сосуде примет комнатную температуру. В период охлаждения воздуха в сосуде созданное там давление немного снизится и потом будет сохраняться неизменным (рисунок 2).

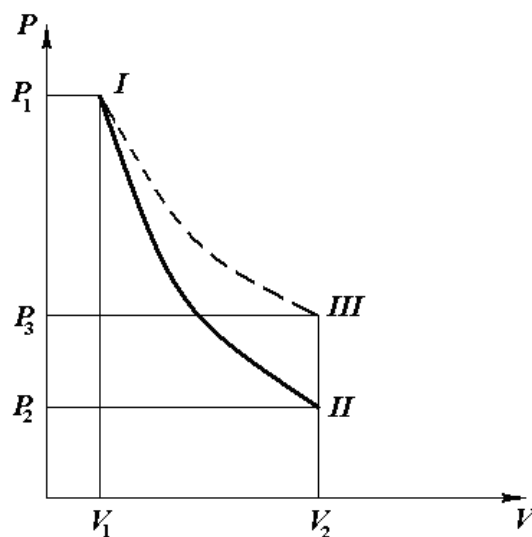


Рисунок 2 График процессов:  
I – II адиабата; II-III изохора; I-III изотерма

При этом избыточное давление  $\Delta\delta$ , определяется по разности уровней жидкости  $h_1$ , т.е.  $\Delta p = \rho g h_1$ . Абсолютная температура окружающего воздуха и воздуха в сосуде одинакова и равна  $T_1$ . Полное давление в сосуде  $P_1$  равно сумме атмосферного  $P_0$  и избыточного давлений, т. е.:

$$P_1 = P_0 + \rho g h_1. \quad (5)$$

Два параметра  $P_1$  и  $T_1$  характеризуют начальное состояние воздуха в сосуде, которое назовем первым состоянием (I-е состояние  $P_1, T_1$ ).

Теперь откроем и быстро (через 1-2 с) закроем кран 4. За этот короткий промежуток времени воздух в сосуде будет расширяться адиабатически (без обмена теплом с окружающей средой), пока его давление не станет равным атмосферному, т. е.  $P_0$ . При адиабатическом расширении воздуха его температура понизится до некоторого значения  $T_2$ . Следовательно, это состояние воздуха будет характеризоваться параметрами  $T_2$  и  $P_0$  (II-е состояние  $P_0, T_2$ ).

После закрытия крана 4 имевшееся давление воздуха в сосуде  $P_0$  будет повышаться, так как в результате теплообмена его температура будет возрастать до значения  $T_1$ , соответствующего температуре окружающего воздуха. Пусть при этом давление достигнет величины

$$P_2 = P_0 + \rho gh_2, \quad (6)$$

где  $\rho gh_2$  — избыточное давление, показываемое манометром, Па.

Таким образом, третье состояние воздуха характеризуется параметрами  $T_1$  и  $P_2$  (III-е состояние  $P_2, T_1$ ).

Обозначим объем той массы воздуха, которая осталась в сосуде после удаления части воздуха (когда он был открыт), через  $V_2$ . До открытия сосуда та же масса воздуха занимала меньший объем  $V_1$ . После открывания крана, когда установилась постоянная температура, также объем  $V_2$ . Сопоставляя первое и третье состояния, заметим, что температура воздуха одинаковая. Очевидно, здесь можно применить закон Бойля-Мариотта, т. е:

$$V_1(P_0 + \rho gh_1) = V_2(P_0 + \rho gh_2)$$

или

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_0 + \rho gh_2}{P_0 + \rho gh_1}. \quad (7)$$

Сравнивая первое и второе состояния, отмечаем, что они имеют разные температуры, процесс расширения происходит адиабатически, т.е. здесь следует применить уравнение Пуассона

$$(P_0 + \rho gh_1)V_1^\gamma = P_0V_2^\gamma. \quad (8)$$

Отсюда находим

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{P_0}{P_0 + \rho gh_1}\right). \quad (9)$$

Возведем обе части равенства (7) в степень  $\gamma$ :

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{P_0 + \rho gh_2}{P_0 + \rho gh_1}\right)^\gamma. \quad (10)$$

Сопоставив равенства (9) и (10), получим

$$\frac{P_0}{P_0 + \rho gh_1} = \left(\frac{P_0 + \rho gh_2}{P_0 + \rho gh_1}\right)^\gamma.$$

После логарифмирования

$$\gamma \lg \frac{P_0 + \rho gh_2}{P_0 + \rho gh_1} = \lg \frac{P_0}{P_0 + \rho gh_1}.$$

Отсюда



$$\gamma = \frac{\lg(P_0 + \rho g h_1) - \lg P_0}{\lg(P_0 + \rho g h_1) - \lg(P_0 + \rho g h_2)}.$$

Применяя математические преобразования, допустимые для приближенных вычислений, получим:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (11)$$

Таким образом, для определения отношения теплоемкостей  $\gamma$  достаточно на опыте измерить давления  $h_1$  и  $h_2$ .

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники:

- для неинженерных специальностей С. 125–146, 223–232 /1/.
- для инженерных специальностей С. 14–37 /2/; С. 81–84 /3/.

3.2 Открыть кран 4 и с помощью насоса медленно увеличивать в сосуде давление до тех пор, пока разность уровней жидкости не достигнет 15–20 см. После этого кран 4 закрыть и наблюдать за показаниями манометра. В течение некоторого времени ( $\sim 1$  мин.) высоты уровней жидкости в манометре изменяются, а затем станут постоянными.

3.3 Отсчитать положение уровней жидкости в обоих коленах манометра и определить разность уровней столба жидкости  $h_1$ .

3.4 Полученное значение  $h_1$  занести в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

№, п/п	Обозначения физических величин							
	$h_1$	$h_2$	$\gamma_i$	$\bar{\gamma}$	$\Delta\gamma_i$	$\Delta\bar{\gamma}$	$\bar{\gamma} \pm \Delta\bar{\gamma}$	$\varepsilon, \%$
1								
2								
3								
4								
5								

3.5 Открыть и через 1–2 с закрыть кран. Давление будет быстро падать и жидкость в манометре, немного поколебавшись, установится на одном уровне. После закрытия крана давление будет постепенно возрастать и, наконец, достигнет предельного значения. Величину этого давления  $h_2$  определить по установившейся разности уровней в обоих коленах манометра и записать в таблицу 1.

3.6 Эксперимент повторить несколько ( $n$ ) раз и полученные результаты также записать в таблицу 1.

3.7 По результатам измерений  $h_1$  и  $h_2$  вычислить значения  $\gamma$  по формуле (11) и занести их в таблицу 1. По этим данным найти среднюю величину  $\bar{\gamma}$  и далее вычислить  $\Delta\gamma_i = |\bar{\gamma} - \gamma_i|$ .

3.8 Вычислить среднеквадратичное отклонение показателя адиабаты  $\bar{\gamma}$

$$S_{\bar{\gamma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\gamma_i)^2}{n(n-1)}}.$$

3.9 По таблицам коэффициентов Стьюдента (приложение А) найти  $t_{p,n}$  для  $n$  и доверительной вероятности  $P=0,997$ .

3.10 Вычислить погрешность  $\Delta\bar{\gamma}$  по формуле

$$\Delta\bar{\gamma} = S_{\bar{\gamma}} \cdot t_{p,n}$$

и относительную ошибку

$$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} 100\% .$$

3.11 Окончательный результат измерения  $\gamma$  представить в виде

$$\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\bar{\gamma} .$$

3.12 Полученную величину  $\gamma$  сопоставить с теоретическим значением, вычисленным по формуле (4). В расчетах принимают воздух за двухатомный газ ( $i=5$ ).

3.13 Сделать вывод.

#### 4 Контрольные вопросы

4.1 Какие газовые процессы называются изотермическими, изохорическими и адиабатическими?

4.2 Представьте график адиабаты и изотермы на  $PV$ -диаграмме. Почему адиабата идет круче изотермы?

4.3 Какой газ называется идеальным?

4.4 Сформулируйте первое начало термодинамики и примените его для изопроцессов.

4.5 Что называется молем газа?

4.6 Дайте определение удельной и мольной теплоемкостей вещества.

4.7 Как формулируется и записывается уравнение Майера?

4.8 Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?

4.9 Сформулируйте теорему Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекулы.

4.10 Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатическом процессе?

4.11 Что называется числом степеней свободы?

**Лабораторная работа №8**  
**Явление поверхностного натяжения жидкости. Определение коэффициента**  
**поверхностного натяжения жидкости**

**Цель и задача работы:** изучение явления поверхностного натяжения, освоение одного из методов измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости, определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

**1 Общие сведения**

Взаимодействие молекул с соседними молекулами на поверхности жидкости приводит к появлению горизонтальной составляющей сил, действующих на молекулы в поверхностном слое. Эти силы также способствуют стремлению поверхности жидкости к сокращению. Они направлены по касательной к поверхности и получили название сил поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha$  – это физическая величина, равная отношению силы  $F$  поверхностного натяжения, приложенной к границе поверхностного слоя жидкости и направленной по касательной к поверхности, к длине  $l$  этой границы:

$$\alpha = F / l . \quad (1)$$

Единица коэффициента поверхностного натяжения – Ньютон на метр ( $H/m$ ).

Теперь легко понять, почему жидкость принимает форму, при которой площадь ее свободной поверхности оказывается наименьшей: силы межмолекулярных взаимодействий втягивают молекулы с поверхности внутрь жидкости, а силы поверхностного натяжения сокращают площадь свободной поверхности, т.е. закрывают образовавшиеся «окна» на этой поверхности.

Итак, поверхностный слой жидкости всегда находится в состоянии натяжения. Однако это состояние нельзя сравнивать с натяжением упруго растянутой пленки. Упругие силы возрастают по мере увеличения площади растянутой пленки, а силы поверхностного натяжения от площади поверхности жидкости не зависят.

На изменение поверхности жидкости требуется затратить определенную работу, которая служит мерой свободной энергии поверхности.

Та часть потенциальной энергии, которая может перейти в работу по изотермическому сокращению поверхности жидкости, называется свободной энергией  $\Delta W$  :

$$\Delta W = \Delta A = \alpha \Delta S . \quad (2)$$

Очевидно, что свободная энергия всей поверхности жидкости равна произведению коэффициента поверхностного натяжения на площадь этой поверхности:

$$W = \alpha \cdot S .$$

Отсюда следует другое определение  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{W}{S} . \quad (3)$$

Коэффициент поверхностного натяжения равен отношению свободной энергии поверхности жидкости к площади этой поверхности.

Поэтому  $\alpha$  можно выражать еще и в джоулях на квадратный метр ( $Дж/м^2$ ).

## 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

В комплект установки входит штатив с зеркалом и столиком, сосуд с жидкостью, кольцо на пружине.

Коэффициент поверхностного натяжения можно измерить методом отрыва кольца. Для этой цели применяется установка (рисунок 1).

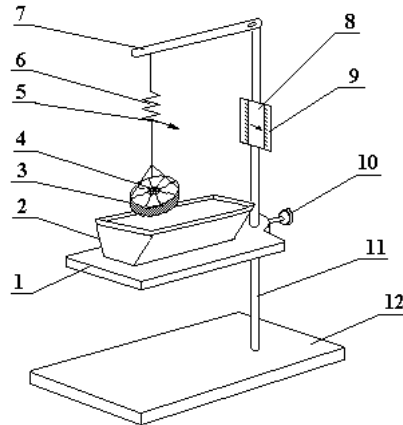


Рисунок 1 Схема установки: 1 - столик; 2 - сосуд жидкостью; 3 –кольцо; 4 – площадка; 5 – стрелка; 6 – пружина; 7 – кронштейн; 8 - зеркало; 9 – миллиметровая шкала; 10 – винт; 11 – стержень; 12 – массивная плита

При погружении смачиваемого кольца в жидкость молекулы пограничного слоя жидкости взаимодействуют с материалом кольца с большей силой, чем друг с другом. При поднимании кольца вместе с ним поднимается и часть жидкости, увеличивается ее поверхность (рисунок 2). Для дальнейшего поднятия кольца нужно преодолеть его вес  $P$ , вес поднятой жидкости и силу поверхностного натяжения, действующую по наружной и внутренней поверхности кольца. Вес поднимаемой жидкости учесть трудно, но им можно пренебречь по сравнению с силами поверхностного натяжения, если взять кольцо с достаточно тонкими стенками. Сила поверхностного натяжения жидкости, действующая по наружной и внутренней поверхности кольца, в соответствии с формулой (1)

$$F = \alpha l = \alpha [\pi D + \pi (D - 2b)] = 2\alpha \pi (D - b),$$

где  $b$  — толщина кольца, м;  $D$  — наружный и  $d = D - 2b$  - внутренний диаметры кольца, м.

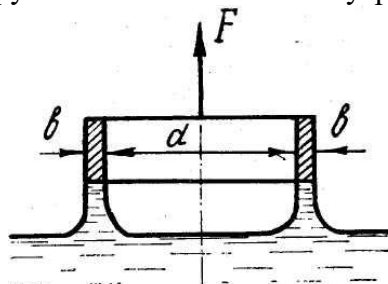


Рисунок 2 Кольцо, касающееся поверхности жидкости

По измеренной силе из последней формулы можно найти коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = F / 2\pi (D - b) \quad (4)$$

Установка, используемая в работе, исключает необходимость взвешивания кольца и предназначена для непосредственного измерения силы поверхностного натяжения  $F$ . Кольцо подвешивают на нежесткую пружину и поднимают столик, на котором установлен сосуд с

исследуемой жидкостью. Смочив нижний край кольца, столик медленно опускают и отмечают на шкале наибольшее опускание стрелки в момент его отрыва от жидкости.

После этого нагружают чашечку над кольцом разновесками и добиваются того же растяжения пружины, что и в момент отрыва его от жидкости. Вес разновесок  $P=mg$  при этом равен силе поверхностного натяжения  $F$ , т.е.  $P = F$ . Тогда формулу (4) можно записать

$$\alpha = mg / 2\pi(D - b) . \quad (5)$$

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 191–202; /2/ С. 128–134; /3/ С. 141–152.

3.2 Определить положение стрелки  $x_0$  с помощью шкалы и зеркала до погружения кольца в воду.

3.3 Налить в сосуд исследуемую жидкость (воду) и поставить на столик под кольцо. Вращая рукоятку, поднять столик до смачивания нижнего края кольца жидкостью. Медленно опускать столик и по стрелке и его изображению на зеркале заметить его положение в момент отрыва от жидкости  $x_i$ .

3.4 Определить удлинение пружины  $\lambda_i = x_0 - x_i$ .

3.5 Опыт проделать не менее 5 раз.

3.6 Вычислить среднее значение удлинения пружины по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}{n} ,$$

где  $n$  – количество измерений.

3.7 Вычислить значения абсолютных погрешностей удлинения как

$$\Delta\lambda_1 = |\bar{\lambda} - \lambda_1|$$

-----

$$\Delta\lambda_n = |\bar{\lambda} - \lambda_n|.$$

3.8 Вычислить среднеквадратичное отклонение  $\bar{\lambda}$ .

$$S_{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\lambda_i)^2}{n(n-1)}} .$$

3.9 По таблицам коэффициентов Стьюдента (приложение А) найти  $t_{p,n}$  для  $n$  и доверительной вероятности  $P = 0,997$ .

3.10 Вычислить погрешность по формуле:

$$\Delta\bar{\lambda} = S_{\bar{\lambda}} \cdot t_{p,n} .$$

3.11 Если полученное значение  $\Delta\bar{\lambda} < 1$  мм, то для дальнейших расчетов  $\Delta\bar{\lambda}$  взять равным 1 мм.

3.12 Снять сосуд со столика.

3.13 Убрав промокательной бумагой прилипшие к кольцу капельки, нагрузить чашку кольца разновесками, добиваясь среднего удлинения  $\bar{\lambda}$ .

3.14 Определить массу гирь.

3.15 Записать значения внешнего диаметра кольца  $D$ , толщины  $b$ , указанные на установке, в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Обозначения физических величин						
	$D \pm \Delta D$	$b \pm \Delta b$	$\lambda$	$\Delta \lambda$	$m$	$\bar{\alpha}$	$\overline{\Delta \alpha}$
1							
2							
3							
4							
5							
Среднее							

3.16 Вычислить среднее значение коэффициента поверхностного натяжения по формуле (5).

3.17 Погрешность измерения  $\alpha$  определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta \alpha}}{\bar{\alpha}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\overline{\Delta m}}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D^2 + \Delta b^2}{(D-b)^2}\right)}. \quad (6)$$

Так как  $m \sim \lambda$ , то  $\frac{\overline{\Delta \lambda}}{\bar{\lambda}} = \frac{\overline{\Delta m}}{m}$ . Тогда формула (6) принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta \alpha}}{\bar{\alpha}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\overline{\Delta \lambda}}{\bar{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D^2 + \Delta b^2}{(D-b)^2}\right)}. \quad (7)$$

3.18 Результаты измерений и расчетов представить в таблице 1.

3.19 Определить абсолютную погрешность

$$\Delta \bar{\alpha} = \varepsilon \bar{\alpha}.$$

3.20 Окончательный результат представить в виде

$$\alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta \bar{\alpha}.$$

3.21 Сделать выводы (сравнить полученное значение  $\alpha$  с табличными значениями для данной жидкости).

## 4 Контрольные вопросы

4.1 Опишите характер теплового движения молекул в жидкостях.

4.2 Объясните, что значит «ближний порядок».

4.3 Почему при отсутствии внешних сил капля жидкости принимает форму шара?

4.4 На что затрачивается работа при увеличении поверхности жидкости?

4.5 Почему работа по увеличению поверхности пропорциональна изменению поверхности?

4.6 Какое явление называют «поверхностным»?

4.7 Что называется коэффициентом поверхностного натяжения? От каких факторов он зависит? В каких единицах он измеряется?

4.8 Почему поверхностно-активные вещества уменьшают коэффициент поверхностного натяжения жидкости?

4.9 Почему коэффициент поверхностного натяжения жидкостей уменьшается с повышением температуры?

## Лабораторная работа № 9

### Изучение электростатического поля методом моделирования

**Цель и задачи работы:** Изучение законов электростатики, получение эквипотенциальных и силовых линий электрического поля для заданной конфигурации электродов, расчет напряженности электрического поля.

#### 1 Общие сведения

Взаимодействие между неподвижными заряженными телами осуществляется посредством электростатического поля. Характеристиками электростатического поля являются напряженность и потенциал. Напряженность является силовой характеристикой, так как определяет величину и направление силы, действующей на точечный положительный единичный заряд в данной точке поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Потенциал является энергетической характеристикой, так как определяет потенциальную энергию взаимодействия точечного положительного единичного заряда с полем в данной точке :

$$\varphi = \frac{W}{q}. \quad (2)$$

Электростатическое поле изображается линиями напряженности (силовыми линиями) и эквипотенциальными поверхностями. Линиями напряженности называются линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности в этой точке. Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Эквипотенциальной поверхностью называется геометрическое место точек в электростатическом поле, имеющих одинаковый потенциал.

Напряженность и потенциал связаны формулой:

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi = -\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \vec{k} \right), \quad (3)$$

где  $\text{grad} \varphi$  - градиент потенциала,  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  - единичные векторы по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно.

Для однородного электростатического поля, считая ось  $x$  направленной вдоль вектора напряженности, формула (3) принимает вид:

$$E = E_x = -\frac{d\varphi}{dx}. \quad (4)$$

Работа при движении заряда в электрическом поле равна:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{r} = q \cdot E \cdot dr \cdot \cos \alpha = -q \cdot d\varphi. \quad (5)$$

Из формулы (5) получаем, что при движении по эквипотенциальной поверхности  $\varphi = \text{const}$ , работа равна нулю, т. к. силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

При изучении электростатического поля, созданного электродами различной конфигурации необходимо знать распределение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей между ними. Для исследования электростатического поля пользуются электролитической ванной, заполненной слабым электролитом (не дистиллированной водой), или влажным песком, в котором расположены электроды, соединенные с источником постоянного тока.

#### 2 Описание установки

В комплект лабораторной установки входит ванна с песком, набор электродов, источник постоянного тока с регулируемым выходным напряжением от 0 до 40 В, вольтметр,

соединительные провода. Электрическая схема установки приведена на рисунке 1.

Песок перед началом работы перемешивают с водой для получения равномерной увлажненности, разравнивают и слегка уплотняют. В песок устанавливают два электрода различной формы по указанию преподавателя и присоединяют их к источнику постоянного тока  $I$ . Один из электродов 2 соединяют с отрицательным полюсом источника питания и с отрицательной клеммой вольтметра, а другой - 3 соединяют с положительным полюсом. Зонд 4 подсоединяют к положительной клемме вольтметра.

При перемещении зонда по влажному песку при одинаковых показаниях на вольтметре, след от его движения изображает эквипотенциальную линию.

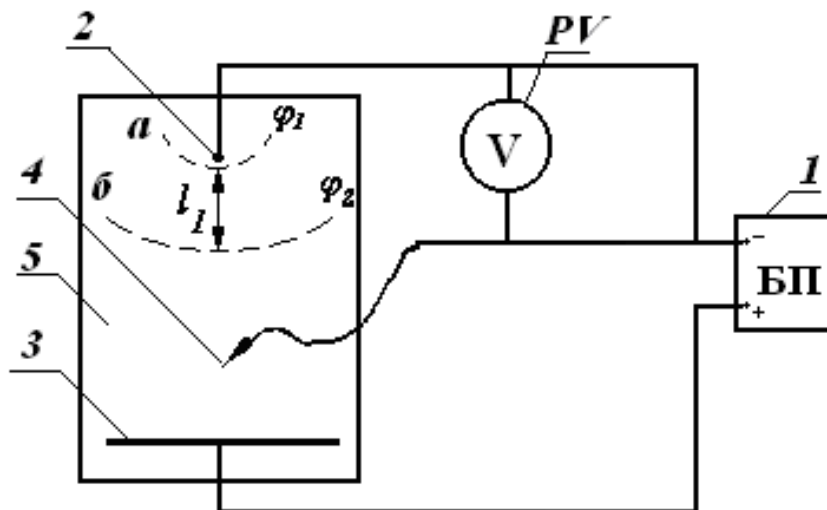


Рисунок 1 Электрическая схема установки:  $I$  – блок питания; 2, 3 – электроды; 4 – зонд с проводом; 5 – ванна с песком;  $a, б$  – эквипотенциальные линии;  $PV$  – вольтметр

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

При подготовке к лабораторной работе необходимо составить конспект по одному из учебников, указанных в библиографическом списке:

/1/ С. 16-24; /3/ С. 148-151, С. 156-158; /4/ С. 184-189; /5/ С. 250-265.

3.1 Ознакомиться с лабораторной установкой и подготовить ее к работе..

3.2 После проверки цепи преподавателем, включить блок питания  $I$ , и, коснувшись зондом 4 электрода 3, установить между электродами 2 и 3 (рисунок 1), указанное преподавателем напряжение  $U, B$ .

3.3 С помощью зонда найти на песке точку, имеющую потенциал  $\varphi_1 = 4 B$  относительно электрода 2. От этой точки провести по песку зондом линию по всей ширине ванны, так, чтобы в процессе движения показания вольтметра не изменялись. След от движения зонда покажет первую эквипотенциальную линию с потенциалом  $4 B$ .

3.4 Повторить измерения по пункту 3.3 не менее 6 раз, каждый раз находя на песке точку с потенциалом большим предыдущего на  $4 B$ .

3.5 Показать преподавателю полученную конфигурацию эквипотенциальных линий.

3.6 Полученную картину изобразить в отчете на рисунке на миллиметровой бумаге.

3.7 Рассчитать напряженность электростатического поля на заданных преподавателем участках между эквипотенциальными линиями по следующей методике:

3.7.1 Пронумеровать эквипотенциальные линии по порядку от отрицательного электрода к положительному. Потенциал отрицательного электрода принять равным нулю. Потенциал положительного электрода относительно отрицательного равен установленному в п. 3.2. Сами



электроды являются эквипотенциальными линиями, отрицательный с номером  $i = 0$ , а положительный – согласно проведенному опыту. Полученные результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерения потенциалов

Номер эквипотенциальной линии $i$	0	1	2	3	4	...
Потенциал на $i$ -линии $\varphi_i, B$	0					

3.7.2 Определить разность потенциалов между близкими эквипотенциальными линиями для заданного участка:

$$U_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i \quad (6)$$

и по линейке расстояние между этими линиями  $l_i$ , где  $i, i+1$  номера эквипотенциальных линий,  $\varphi_i, \varphi_{i+1}$ , соответствующие потенциалы. Результаты записать в таблицу 2.

3.7.3 Рассчитать напряженность электрического поля между эквипотенциальными линиями в заданной области по формуле

$$\overline{E}_i = \frac{U_i}{l_i}. \quad (7)$$

3.8 Погрешность разности потенциалов равна сумме погрешностей измерения потенциала, т.е.:

$$\Delta U_i = \Delta \varphi_{i+1} + \Delta \varphi_i = 2 \cdot \Delta \varphi, \quad (8)$$

где  $\Delta \varphi = \Delta \varphi_i = \Delta \varphi_{i+1}$ .

Величина  $\Delta \varphi$  определяется через класс точности  $\gamma$  вольтметра:

$$\Delta \varphi = \frac{U_{np} \cdot \gamma}{100}, \quad (9)$$

где  $U_{np}$  - предел измерения вольтметра,  $B$ ;  $\gamma$  - класс точности вольтметра.

3.9 Погрешность измерения расстояния как разности координат равна сумме инструментальных погрешностей, т.е.  $2 \cdot \Delta l$ , где  $\Delta l$  погрешность линейки (половина цены наименьшего деления используемой линейки).

3.10 Рассчитать погрешность  $\Delta \overline{E}_i$  определения напряженности по формуле:

$$\Delta \overline{E}_i = \overline{E}_i \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_i}{U_i}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta l}{l_i}\right)^2}. \quad (10)$$

3.11 Записать полученные результаты в таблицу 2.

Таблица 2 Данные для расчета напряженности электрического поля

Номер опыта	Обозначения физических величин					
$i$	$U_i, B$	$\Delta U_i, B$	$l_i, м$	$\Delta l, м$	$\overline{E}_i, \frac{B}{м}$	$\Delta \overline{E}_i, \frac{B}{м}$
1						
2						
3						
4						

3.12 Результаты определения напряженности для каждого участка представить в виде:

$$E_i = (\overline{E}_i \pm \Delta \overline{E}_i) \frac{B}{м}. \quad (11)$$

3.13 Дополнить рисунок на песке и в отчете силовыми линиями (не менее 3) , проводя их от электрода к электроду перпендикулярно эквипотенциальным линиям. Около электродов показать знаки их зарядов. Построить на рисунке в отчете векторы напряженности электрического поля.

3.14 По проделанной работе и полученным результатам сделать выводы.

#### **4 Контрольные вопросы**

4.1 Как формулируется закон Кулона?

4.2 Как даются определения напряженности и потенциала электрического поля в данной точке?

4.3 Как связана работа по перемещению заряда в электрическом поле с знаком заряда и изменением его кинетической и потенциальной энергии?

4.4 Как выражается связь между напряженностью электрического поля и потенциалом?

4.5 Как наглядно изобразить электрическое поле? Как выглядит изображение поля системы двух одноименных и двух разноименных зарядов?

4.6 Что такое циркуляция вектора напряженности электрического поля?

4.7 Почему циркуляция вектора напряженности электростатического поля равна нулю?

4.8 Как формулируется теорема Гаусса (Остроградского-Гаусса)?

4.9 Что такое градиент потенциала?

## Лабораторная работа № 10

### Исследование зависимости электрического сопротивления проводника от температуры

**Цель и задачи работы:** Изучение физических основ теории электропроводности металлов, получение экспериментальной зависимости сопротивления металлического проводника от температуры, определение температурного коэффициента сопротивления материала проводника.

#### 1 Общие сведения

Электрическим сопротивлением называется величина, характеризующая противодействие проводника или цепи электрическому току. Электрическое сопротивление участка цепи, не содержащего ЭДС, при постоянном напряжении на его концах – скалярная величина равная отношению напряжения концов проводника к величине тока в нем (закон Ома для участка цепи). Это сопротивление называется омическим или активным и зависит от размеров формы и материала проводника. Сопротивление  $R$  однородного по составу проводника при постоянных сечении  $S$  и длине  $l$  дается формулой:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводника.

Электрическое сопротивление обусловлено рассеянием электронов проводимости на тепловых колебаниях кристаллической решетки и ее структурных неоднородностях. Поэтому обычно сопротивление зависит от температуры, лишь при  $T \rightarrow 0$ , когда тепловые колебания не влияют на величину сопротивления, оно определяется только кристаллической структурой и не зависит от  $T$ . При сверхнизких температурах 2 – 4 K у некоторых металлов и сплавов наблюдается отсутствие сопротивления (сверхпроводимость).

Экспериментально установлено, что при комнатных температурах зависимость сопротивления проводника от температуры описывается следующей формулой:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (2)$$

где  $R_t$  - сопротивление проводника при температуре  $t$  °C;  $R_0$  - сопротивление при 0 °C;  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления,  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

#### 2 Описание лабораторной установки

В комплект лабораторной установки входят: сушильный шкаф с исследуемым проводником, цифровой омметр, термометр, соединительные провода. Лабораторная установка схематически изображена на рисунке 1.

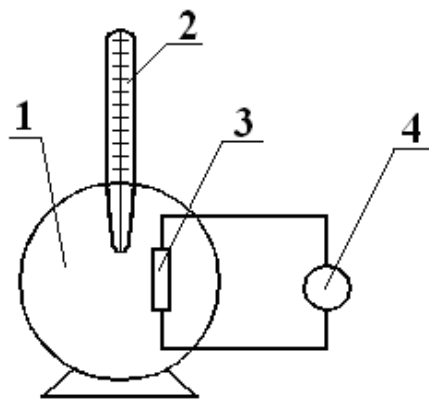


Рисунок 1 Схема лабораторной установки: 1- сушильный шкаф; 2 – термометр; 3 – исследуемый проводник; 4 – цифровой омметр

В сушильном шкафу установлен исследуемый проводник, подключенный к цифровому омметру. Степень нагрева задается регулятором на корпусе шкафа. Омметр в данной установке работает в «мигающем» режиме. В течение нескольких секунд индикатор омметра показывает определенное значение сопротивления, хотя оно зависит от изменяющейся со временем температуры, затем переключается на достигнутое значение сопротивления. Время индикации величины сопротивления можно изменять в определенных пределах соответствующим регулятором на панели омметра.

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

При подготовке к лабораторной работе необходимо составить конспект по одному из учебников, указанных в библиографическом списке: /1/ С. 269-270; /2/ С. 186-187; /2/ С. 450-452; /3/ С 236-240; /4/ С. 300-304.

3.1 Подключить исследуемый проводник к цифровому омметру.

3.2 Включить омметр в электрическую сеть, прогреть его 30...40 секунд, по термометру измерить комнатную температуру  $t_k$  и омметром измерить соответствующую величину сопротивления исследуемого проводника  $R_k$  (с точностью до 0,1 Ом).

3.3 Включить в электрическую сеть сушильный шкаф. В процессе нагрева, начиная с температуры 30 °С, измерять сопротивление исследуемого проводника (с точностью до 0,1 Ом). Измерения производить через каждые 10 °С до 100°С. Результаты измерений записать в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерения зависимости сопротивления проводника от температуры

Обозначения физических величин				
№ измерения	1	2	...	$n$
$t, ^\circ\text{C}$				
$R_t, \text{Ом}$				

3.4 Когда температура достигнет 100 °С, выключить печь и омметр.

3.5 Построить график температурной зависимости сопротивления проводника  $R = f(t)$  на миллиметровой бумаге, откладывая по горизонтальной оси температуру в градусах Цельсия (рекомендуемый масштаб 10 град/см), а по вертикальной оси - величину измеренного сопротивления (рекомендуемый масштаб 0,5 Ом/см). График строить в виде прямой линии, проходящей через точку, полученную при комнатной температуре. При этом необходимо, чтобы примерно половина экспериментальных точек находилась над линией, а половина - под ней, как на рисунке 2:

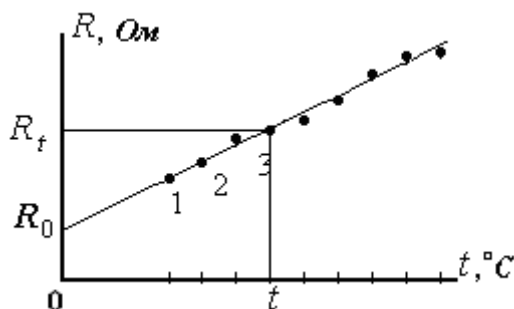


Рисунок 2 Примерный вид графика зависимости сопротивления от температуры

3.6 Продолжить линию графика до пересечения с вертикальной осью, эта процедура называется экстраполяцией. По графику определить сопротивление  $R_0$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  и определить точки, лежащие точно на прямой на рисунке 2 точки 1, 2 и 3.

3.8 Для точки лежащей точно на прямой, ближе к концу графика, на рисунке 2 это точка 3, рассчитать среднее значение температурного коэффициента сопротивления. Из формулы (2) следует, что температурный коэффициент сопротивления  $\bar{\alpha}$  вычисляется по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t}. \quad (3)$$

Подставив в (3) полученные значения  $R_0$ ,  $t$ ,  $R_t$ , найти  $\bar{\alpha}$ .

3.9 Поскольку при измерениях значения  $R_t$  округлялись до 0,1 Ом, то погрешности  $\Delta R_0$  и  $\Delta R_t$  следует принять равными  $\pm 0,05$  Ом. Погрешность  $\Delta \alpha$  рассчитать по формуле:

$$\Delta \alpha = \bar{\alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta R_t + \Delta R_0}{R_t - R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  - инструментальная погрешность термометра (половина цены деления).

3.10 Результаты представить в виде:

$$R_0 = R_0 \pm \Delta R_0 \quad \text{и} \quad \alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta \alpha. \quad (5)$$

Используя полученные числовые значения, записать уравнение прямой в виде

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \bar{\alpha} \cdot t). \quad (6)$$

3.11 Сделать выводы. Сравнить полученное значение  $\bar{\alpha}$  со справочником и определить материал проводника.

#### 4 Контрольные вопросы

4.1 Что представляет собой ток в металлах?

4.2 Как зависит сопротивление металлического проводника от температуры?

4.3 Как зависит сопротивление проводника правильной формы от его размеров?

4.4 Какими причинами обусловлено сопротивление проводников?

## Лабораторная работа №11

### Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли

**Цель и задачи работы:** Изучить физическую природу и свойства магнитного поля, закон Био-Савара-Лапласа и закон Ампера. Определить горизонтальную составляющую вектора магнитной индукции магнитного поля Земли.

#### 1 Общие сведения

Известно, что вокруг Земли существует магнитное поле, оно называется геомагнитным полем (ГМП).

Магнитное поле Земли напоминает магнитное поле полосового магнита (рисунок 1).

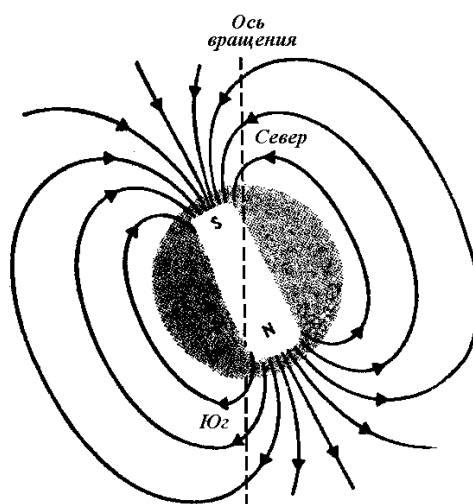


Рисунок 1 Магнитное поле Земли

Ось геомагнитного поля не совпадает с осью вращения Земли. В северном полушарии расположен южный магнитный полюс  $S$ , а в южном полушарии - северный магнитный полюс  $N$ . Силовые линии магнитного поля в зонах полюсов перпендикулярны к поверхности Земли, на экваторе параллельны, а в средних широтах направлены под углом к поверхности Земли. Поэтому вектор магнитной индукции  $B_3$  (следовательно и  $H_3$ ) в некоторой точке средней широты можно разложить на две составляющие: горизонтальную  $B_r$ , равную проекции вектора  $B_3$  на плоскость горизонта  $K, L$ , и вертикальную составляющую  $B_v$ , равную проекции вектора  $B_3$  на радиус Земли  $CO$  (рисунок 2).

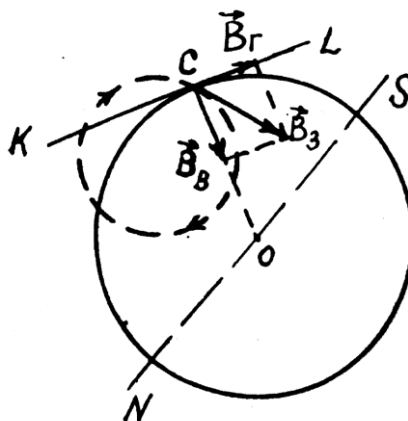


Рисунок 2 Горизонтальная  $B_r$  и вертикальная  $B_v$  составляющие вектора магнитной индукции  $B_3$  Земли

## 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Установка состоит из тангенс-гальванометра, амперметра, блока питания и реостата.

В настоящей работе измеряется горизонтальная составляющая вектора индукции магнитного поля с помощью тангенс-гальванометра. Тангенс-гальванометр состоит из кольца, укрепленного на подставке вертикально (рисунок 3). В желобе кольца помещены витки катушки проводника, по которым можно пропустить электрический ток. В центре кольца расположен прибор, состоящий из корпуса со шкалой и магнитной стрелкой (компас), которая может вращаться вокруг вертикальной оси. Корпус со шкалой может поворачиваться относительно стрелки, что используется для совмещения нулевого значения шкалы со стрелкой.

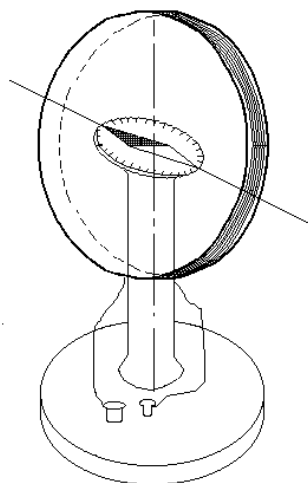


Рисунок 3 Тангенс-гальванометр

При отсутствии тока в катушке магнитная стрелка всегда устанавливается вдоль магнитного меридиана Земли, при этом северный полюс магнитной стрелки направлен к южному магнитному полюсу Земли (к северному географическому полюсу). Поворотом подставки плоскость кольца можно совместить с осью, проходящей через концы магнитной стрелки. В этом случае магнитная стрелка и кольцо будут находиться в плоскости магнитного меридиана Земли.

Если по катушке пропустить постоянный ток, то стрелка повернется на некоторый угол  $\alpha$  (рисунок 4). Этот поворот стрелки обусловлен магнитным полем кругового тока, протекающего по катушке. На магнитную стрелку в этом случае будут действовать два поля: магнитное поле Земли и магнитное поле, созданное током. Стрелка тангенс - гальванометра устанавливается по направлению результирующей  $\vec{B}$  двух векторов: вектора  $\vec{B}_Г$  – горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли и вектора  $\vec{B}_Т$  – индукции магнитного поля кругового тока.

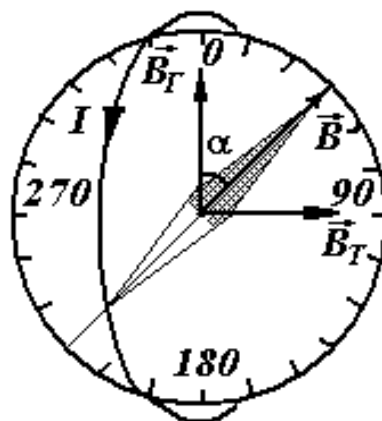


Рисунок 4 Сложение двух векторов  $\vec{B}_Г$  и  $\vec{B}_Т$

Вектор  $\vec{B}_r$  лежит в плоскости катушки, а вектор  $\vec{B}_T$  ей перпендикулярен. Из рисунка 4 видно, что

$$\frac{B_T}{B_r} = \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

Откуда

$$B_r = \frac{B_T}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (2)$$

Индукция магнитного поля в центре катушки равна

$$B_r = \frac{\mu_0 \mu \cdot I \cdot n}{2r}, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока в катушке,  $n$  – число витков катушки,  $r$  – ее радиус,  $\mu$  – магнитная проницаемость среды (в данном случае для воздуха  $\mu = 1$ ),  $\mu_0$  – магнитная постоянная:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Подставив выражение (3) в формулу (2), получим:

$$B_r = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (4)$$

Таким образом, если расположить кольцо тангенс–гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли, пропустить по его катушке электрический ток и измерить силу тока в катушке и угол отклонения магнитной стрелки, можно определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли.

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 244 – 255; /2/ С. 202 – 208, /3/ С. 134 – 142, С. 149 – 151.

3.2 Собрать электрическую схему установки согласно рисунку 5 и после ее проверки получить у преподавателя разрешение включить блок питания в сеть.

3.3 Начертить таблицу для записи результатов измерений.

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

№	Обозначения физических величин					
	$I, A$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{\alpha}$	$B_r, \text{Тл}$	$\Delta B_r, \text{Тл}$
1						
2						
3						
4						
5						

$n =$  ;  $r =$  м;  $\Delta r =$  м;  $\Delta I =$  А;  $\Delta \alpha =$  .

3.4 Записать под таблицей численные значения числа витков  $n$  катушки, радиуса кольца  $r$  и абсолютных погрешностей измерения радиуса кольца  $\Delta r$  катушки тангенс – гальванометра, угла отклонения магнитной стрелки  $\Delta \alpha$  (зависит от цены деления компаса) и погрешности амперметра  $\Delta I$ .



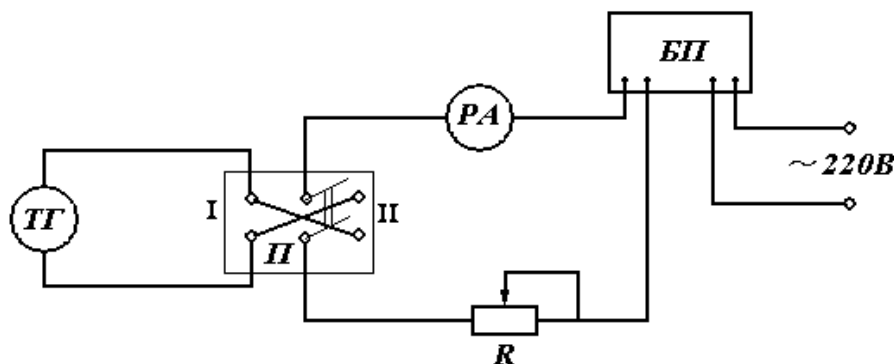


Рисунок 5 Электрическая схема установки: ТГ – тангенс-гальванометр; П – переключатель; РА – амперметр; R – реостат; БП – блок питания

Реостат и амперметр расположить как можно дальше от тангенс-гальванометра.

3.5 Медленно поворачивая площадку тангенс-гальванометра относительно вертикальной оси, совместить плоскость катушки с осью, проходящей через концы магнитной стрелки (при отсутствии тока в катушке), чтобы северный конец магнитной стрелки совпадал с нулем шкалы компаса.

3.6 Включить установку в электрическую цепь и установить переключатель в положение I.

3.7 С помощью реостата установить по амперметру ток 0,1 А.

3.8 После успокоения магнитной стрелки отсчитать угол отклонения, записать в таблицу значение силы тока и угла  $\alpha_1$ .

3.9 Переключив переключатель в положение II, изменить направление тока в цепи на противоположное. По амперметру проверить величину тока, величина тока должна быть такой же, как и в первом положении ключа. Отсчитать угол отклонения  $\alpha_2$  магнитной стрелки в противоположном направлении и записать его в таблицу 1.

3.10 Вычислить среднее арифметическое значение угла отклонения  $\bar{\alpha}$ .

3.11 Реостатом изменить силу тока в цепи (величину тока задаёт преподаватель) и повторить измерения, указанные в пунктах 3.7 ... 3.9).

3.12 По измеренным значениям силы тока  $I$  и угла  $\bar{\alpha}$  отклонения магнитной стрелки рассчитать для каждого опыта величину горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли  $B_H$  по формуле (4).

3.13 Вычислить среднее арифметическое значение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли  $\overline{B_H}$ .

3.14 Вычислить инструментальную относительную ошибку  $\mathcal{E}$  магнитной индукции  $\overline{B_H}$  по формуле (5)

#### 4. Контрольные вопросы

4.1. Что представляет собой магнитное поле Земли?

4.2. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Как определяется направление магнитного поля создаваемого проводником с током?

4.3. Как определить магнитное поле в центре кругового тока, катушки с током?

4.4. Как называется прибор, который используется для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и из чего он состоит?

4.5. Запишите расчетную формулу для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Какие физические величины необходимо измерить при выполнении работы?

4.6. Опишите порядок выполнения работы.

## Лабораторная работа № 12

### Определение удельного заряда электрона методом фокусировки в магнитном поле

**Цель и задачи работы:** Изучение движения электронов в магнитном поле. Определение удельного заряда электрона.

#### 1 Общие сведения

Траектория движения заряженной частицы зависит не только от индукции магнитного поля  $\vec{B}$ , но и от направления скорости движения заряда к магнитному полю. Пусть положительно заряженная частица  $q$  влетает под углом  $\alpha$  в магнитное поле

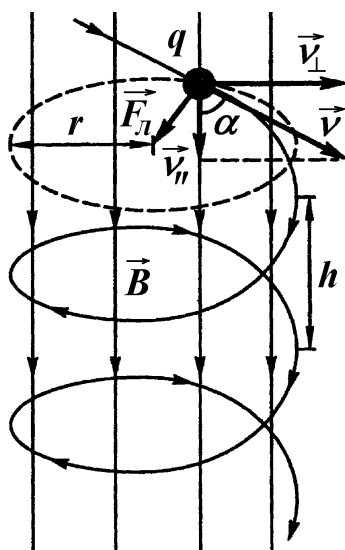


Рисунок 1 Траектория движения заряженной частицы  $q$  в магнитном поле:  $R$  – радиус окружности;  $h$  – шаг винтовой линии

Скорость частицы  $q$ , влетевшей в магнитное поле под углом  $\alpha$  к линиям индукции, можно разложить на две составляющие: параллельную  $\vec{v}_{||}$  вектору  $\vec{B}$  и перпендикулярную к нему  $v_{\perp}$ .

Со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу действует сила Лоренца  $\vec{F}$ , перпендикулярная вектору  $v_{\perp}$  и изменяющая его направление. (Направление  $\vec{F}$  определяется правилом левой руки). На составляющую  $\vec{v}_{||}$  магнитное поле не действует и частица движется с постоянной скоростью  $\vec{v}_{||}$  (равномерное движение). Результатом сложения двух движений (движение по окружности с постоянной по величине скоростью  $v_{\perp}$  и равномерного перемещения со скоростью  $\vec{v}_{||}$  вдоль силовой линии поля) является движение частицы по спирали, ось которой направлена параллельно вектору  $\vec{B}$ .

Так как сила Лоренца  $\vec{F}$ , перпендикулярная к вектору  $v_{\perp}$ , является центростремительной силой  $\vec{F}_c$ :

$$\begin{aligned}\vec{F}_L &= \vec{F}_c \\ F_L &= q \cdot v \cdot B \sin \alpha = q \cdot v_{\perp} \cdot B\end{aligned}\tag{1}$$

$$F_y = \frac{m \cdot v_{\perp}^2}{R}$$

где  $R$  – радиус окружности, описываемой частицей  $q$ ,  $m$  – масса этой частицы.  
Поэтому

$$q \cdot v_{\perp} \cdot B = \frac{m \cdot v_{\perp}^2}{R} \quad (2)$$

Отсюда

$$R = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B} = \frac{m \cdot v \cdot \sin \alpha}{q \cdot B} \quad (3)$$

Шаг спирали (или шаг винтовой линии)

$$h = T \cdot v_{\parallel} = T \cdot v \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

где  $T$  – период обращения частицы.

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi \cdot v_{\perp} \cdot m}{q \cdot B \cdot v_{\perp}} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B} \quad (5)$$

$\frac{q}{m}$

- называется удельным зарядом.

Учитывая это, можно записать шаг винтовой линии

$$h = \frac{2\pi \cdot m \cdot v}{q \cdot B} \cos \alpha \quad (6)$$

Скорость заряженной частицы зависит от разности потенциалов  $\Delta\varphi$ , которую она прошла в электрическом поле, и определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2q \cdot \Delta\varphi}{m}} \quad (7)$$

Поставив выражение (7) в формулы (3) и (6)

Получим формулы для радиуса и шага винтовой линии:

$$R = \sqrt{\frac{2m \cdot \Delta\varphi}{q}} \cdot \frac{\sin \alpha}{B} \quad (8)$$

$$h = \frac{2\pi}{B} \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot \Delta\varphi}{q}} \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

## 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Установка состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) блока питания анода ЭЛТ, соленоида; блоки питания для накала ЭЛТ ( $\sim 6,3$  В) и соленоида ( $0 \div 24$  В); амперметра; переключателя направления тока. Электронно-лучевая трубка установлена так, что ее ось, проходящая через центры анодов  $A_1$ ,  $A_2$  и экрана Э, параллельна оси соленоида С (рисунок 2).

При нагревании катода  $R$  нитью накала  $H$  происходит явление термоэлектронной эмиссии и над катодом образуется электронное облако. В электростатическом поле, создаваемом между анодом  $A_2$  и катодом  $K$ , электроны ускоряются и приобретают скорость (вектор которой параллелен оси ЭЛТ). Пролетев через узкие отверстия диафрагмы  $D$  и анодов  $A_1$  и  $A_2$ , электроны движутся далее равномерно и попадают на экран, покрытый люминофором. При этом на экране появляется светящееся пятно.

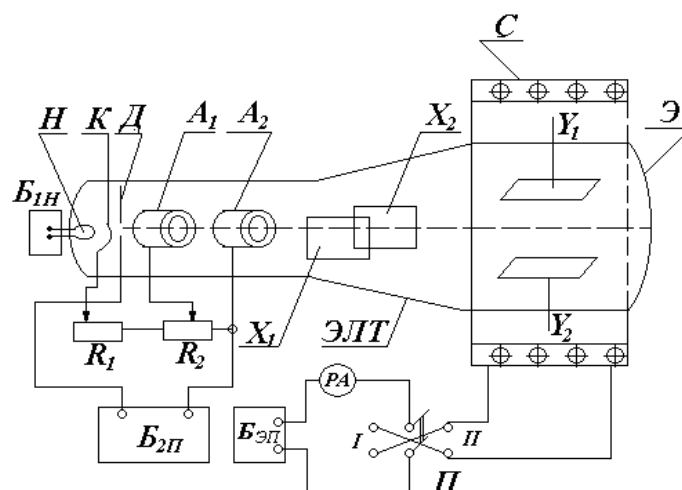


Рисунок 2 Электрическая схема установки: электронно-лучевая трубка ( $H$  – нить накала;  $K$  – катод;  $D$  – диафрагма;  $A_1$  и  $A_2$  – аноды;  $X$  и  $Y$  – горизонтально и вертикально отклоняющие пластинки;  $\mathcal{E}$  – экран);  $B_{1H}$  – блок питания накала;  $B_{2П}$  – блок питания анода;  $B_{3П}$  – блок питания соленоид;  $R_1$  – резистор для регулирования яркости;  $R_2$  – резистор для регулировки четкости изображения (фокусировка);  $C$  – соленоид;  $\Pi$  – переключатель тока в соленоиде;  $PA$  – амперметр

Регулировка яркости пятна и его фокусировка производится резисторами  $R_1$  и  $R_2$ , которые выведены на лицевую панель блока питания анода и обозначены соответственно «яркость» и «фокусировка». Между анодом  $A_2$  и экраном расположены две пары отклоняющих пластин  $X_1$ ,  $X_2$  и  $Y_1$  и  $Y_2$ . Если пластины не заряжены (электростатическое поле между  $X_1$ ,  $X_2$ , а также между  $Y_1$  и  $Y_2$  отсутствует), то электроны движутся прямолинейно вдоль оси ЭЛТ и попадают в центр экрана.

Если в соленоиде создавать магнитное поле индукцией  $B$ , то положение светящейся точки на экране ЭЛТ не изменится, так как вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  параллелен (или антипараллелен) вектору скорости движения электронов  $\vec{v}$  и

$$F_L = 0. \quad (10)$$

Электроны, движущиеся с большой скоростью, попадая на экран ЭЛТ, из люминофора выбивают вторичные электроны, которые оседают на ближайших к экрану отклоняющих пластинках  $Y_1$  и  $Y_2$  и заряжают их (пара пластин  $X_1$ ,  $X_2$  соединены между собой и заземлены). Таким образом, между пластинками  $Y_1$  и  $Y_2$  создается электростатическое поле, вектор напряженности которого направлен перпендикулярно вектору скорости движения электронов  $v_z$  (рисунок 3), влетающих в это поле.

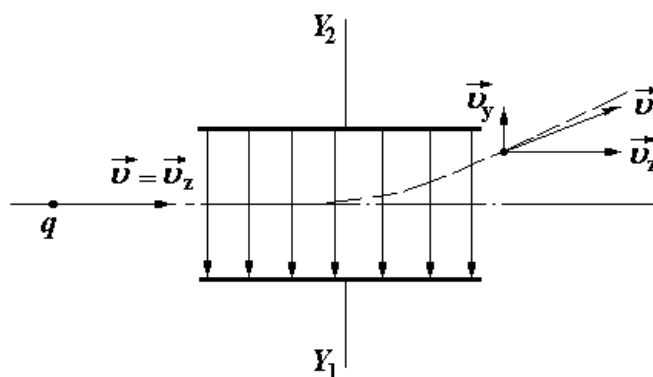


Рисунок 3 Движение заряженной частицы в электрическом поле конденсатора

В пространстве между пластинами на электроны действует сила, направленная перпендикулярно к положительно заряженной отклоняющей пластинке  $Y_2$ . У электронов появляется перпендикулярная составляющая скорости  $v_y$ . При выходе из области электростатического поля между пластинками  $Y_1$  и  $Y_2$  электроны движутся со скоростью  $\vec{v}$ , вектор которой отклонен на угол  $\alpha$  от оси ЭЛТ. Если в соленоиде создать магнитное поле, то вектор скорости электронов будет составлять такой же угол  $\alpha$  с вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Следовательно, в пространстве между отклоняющими пластинками  $Y$  и экраном под действием силы Лоренца электроны будут двигаться по винтовой траектории с шагом  $h$ .

Если угол  $\alpha$  небольшой, то  $\cos \alpha \approx 1$  и формулу (6) с учетом  $q = e$  ( $e$  – заряд электрона) можно представить в виде:

$$h = \frac{2\pi v}{\left(\frac{e}{m}\right) \cdot B} \quad (11)$$

Из выражений (11) и (7) можно получить формулу для вычисления удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{h^2 \cdot B^2}, \quad (12)$$

где  $U$  – напряжение между анодом и катодом равное разности потенциалов  $\Delta\varphi$  (значение приведено на установке),  $B$  – индукция магнитного поля в соленоиде.

Индукцию магнитного поля в соленоиде можно вычислить по формуле:

$$B = k \cdot I, \quad (13)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $I$  – сила тока в соленоиде. Величина  $k$  определена при градуировке соленоида с помощью измерителя магнитной индукции (ее значение приведено на установке).

Шаг винтовой траектории  $h$  можно найти, зная число полных оборотов  $n$ , которые проделали электроны, двигаясь по винтовой траектории, проходя расстояние  $\ell$  от отклоняющих пластинок до экрана ЭЛТ (значение  $\ell$  приведено на установке).

$$h = \frac{\ell}{n}, \quad (14)$$

Подставляя (14) и (13) в формулу (12) получаем окончательное выражение для расчета удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 n^2 U}{\ell^2 k^2 I^2}. \quad (15)$$

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 368 – 373; /2/ С. 208 – 213; /3/ С. 142 – 149, С. 252 – 258.

3.2 Проверить электрическую схему установки и наличие всех приборов, необходимых для выполнения лабораторной работы.

3.3 После проверки схемы преподавателем включить приборы в сеть.

3.4 С помощью регуляторов «яркость» и «фокус» на экране осциллографа получить светящуюся точку (изображение электронного луча). Включить блок питания соленоида в сеть и установить по амперметру такие значения силы тока  $I$ , при которых электронный луч на экране ЭЛТ сделает  $n$  полных оборотов (один полный оборот – поворот электронного луча около центра на  $360^\circ$ ) ( $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ ).

3.5 Значения  $I$  и  $n$  записать в таблицу 1.

3.6 Выключить установку.

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

п/п	Обозначения физических величин						
	$I, A$	$n$	$U, B$	$\frac{e}{m},$ $Kл/кг$	$\left(\frac{e}{m}\right),$ $Kл/кг$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right),$ $Kл/кг$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right),$ $Kл/кг$

3.7 Вычислить по формуле (14) удельный заряд электрона. Вычислить среднее значение удельного заряда электрона  $\left(\frac{e}{m}\right)$ , и сравнить результаты эксперимента с его теоретическим (табличным) значением  $\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{теор.}}$ .

3.8 Вычислить инструментальную относительную и абсолютную погрешности по формулам (16) и (17):

$$\varepsilon = \sqrt{4\left(\frac{\Delta\pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2}. \quad (16)$$

$$\Delta\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m}\right) \cdot \varepsilon. \quad (17)$$

3.9 Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 1.

3.10 Записать результат в виде

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m} \pm \Delta\frac{e}{m}\right) \frac{Kл}{кг}.$$

#### 4 Контрольные вопросы

4.1 Какая сила действует на заряженную частицу в магнитном поле?

4.2 Как движется заряженная частица, за счет действия на неё силы Лоренца?

4.3 Как определяется направление силы Лоренца?

4.4 Чему равна работа силы Лоренца?

4.5 Вывести формулу для расчета радиуса траектории, периода вращения заряженных частиц в магнитном поле.

4.6 Объясните, почему при увеличении силы тока в соленоиде электронный луч на экране ЭЛТ описывает винтовую линию не постоянным, а постепенно убывающим радиусом?

## Лабораторная работа 13

### Катушка в цепи переменного тока. Определение индуктивности катушки

**Цель и задачи работы:** Изучение электромагнитных колебаний в цепи переменного тока, содержащей катушку; определить индуктивность катушки.

#### 1 Общие сведения

Самоиндукция представляет собой частный случай электромагнитной индукции. Явление самоиндукции состоит в том, что первичный переменный ток в контуре индуцирует ток самоиндукции в самом контуре. При этом магнитный поток  $\Phi$ , связанный с контуром, пропорционален силе тока  $I$  в контуре:

$$\Phi = LI, \quad (1)$$

где  $L$  – индуктивность контура.

Предположим, что за время  $dt$  сила тока в контуре изменяется на  $dI$ . Тогда, согласно формуле (1), магнитный поток изменится на

$$d\Phi = LdI, \quad (2)$$

в результате чего в контуре появится электродвижущая сила самоиндукции

$$E_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}. \quad (3)$$

Индуктивность  $L$  характеризует индукционные свойства контура, в системе СИ измеряется в генри ( $Гн$ ). Индуктивность зависит от форм и размеров контура и от магнитных свойств среды.

#### 2.1 Описание установки и вывод расчетной формулы

Установка состоит из амперметра, вольтметра, катушки индуктивности и трансформатора.

Электрическая схема установки приведена на рисунке 1. На рисунке показана катушка (1) из медного провода, намотанного на каркас (2), который надевается на ферромагнитный сердечник из двух частей (верхний  $\Gamma$ -образный сердечник съемный, который называется «перемычкой»), вольтметр  $PV$ , амперметр  $PA$  и трансформатор  $T$  с выходными напряжениями  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ .

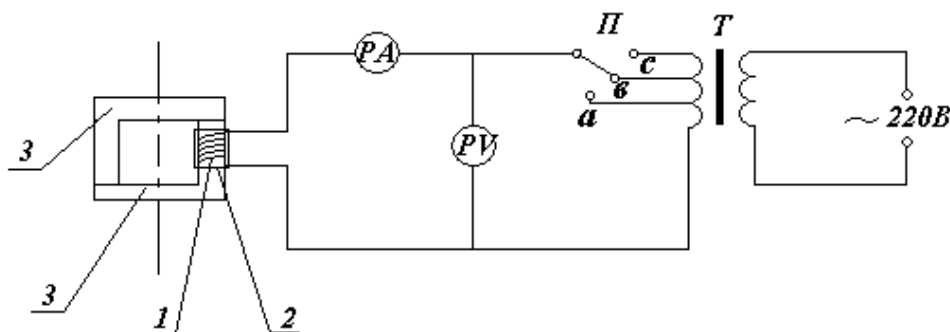


Рисунок 1 Электрическая схема для измерения индуктивности катушки: 1 – катушка; 2 – каркас катушки; 3 – ферромагнитный сердечник состоящий из двух частей,  $T$  – трансформатор,  $\Pi$  – переключатель;  $PA$  – амперметр;  $PV$  – вольтметр

Сила тока  $I$  в цепи согласно закону Ома равна:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (9)$$

где  $U$  – напряжение на катушке,  $Z$  – полное сопротивление катушки, которое в цепи переменного тока определяется по формуле:

$$Z^2 = R^2 + R_L^2, \quad (10)$$

где  $R$  – активное (омическое) сопротивление катушки,  $R_L$  – индуктивное сопротивление равное

$$R_L = \omega \cdot L. \quad (11)$$

где  $\omega = 2\pi \cdot \nu$  – циклическая частота,  $\nu$  – частота переменного тока ( $\nu = 50 \text{ Гц}$ ).

На основании формулы (11), (12) и (13) определим индуктивность катушки

$$L = \frac{1}{2\pi \cdot \nu} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}. \quad (12)$$

### 3.1 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 382 – 395, /2/ С. 221 – 231, /3/ С. 215 – 234.

3.1.2 Убедиться в наличии всех приборов, необходимых для выполнения работы согласно электрической схеме (рисунок 1).

3.1.3 Руководствуясь схемой (рисунок 1), собрать электрическую цепь, замкнуть ферромагнитный сердечник 3 и, после получения разрешения преподавателя, включить трансформатор  $T$  в сеть.

3.1.4 Включить переключатель  $\Pi$  в положение  $a$  и по вольтметру  $PV$  измерить напряжение  $U_1$ , и по амперметру  $PA$  измерить силу тока  $I_1$  в катушке 1. Полученные значения занести в таблицу 1

3.1.5 Переключить переключатель  $\Pi$  в положение  $b$  и повторить измерения и вычисления по пункту 3.1.4. Далее переключатель  $\Pi$  поставить в положение  $c$  и снова повторить измерения и вычисления по пункту 3.1.4.

3.1.6 Вычислить по формуле (12) значения  $L$ . Значение  $R$ , измеренное омметром равно  $10 \text{ Ом}$ , а его абсолютная погрешность  $\Delta R = 0,5 \text{ Ом}$ .

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

№	Обозначения физических величин						
	$U, В$	$I, А$	$Z, Ом$	$L_i, Гн$	$\bar{L}, Гн$	$\Delta L_i, Гн$	$\Delta \bar{L}, Гн$
с перемычкой							
1							
2							
3							
без перемычки							
1							
2							
3							

3.1.7 Рассчитать относительную погрешность индуктивности по следующей формуле:

$$\text{где } \varepsilon = \frac{\Delta \bar{L}}{\bar{L}} = \sqrt{\left(\frac{\bar{Z} \cdot \Delta \bar{Z}}{\bar{Z}^2 - R^2}\right)^2 + \left(\frac{R \cdot \Delta R}{\bar{Z}^2 - R^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \omega}{\omega}\right)^2}, \quad (13)$$



$$\Delta \bar{Z} = \bar{Z} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}, \quad \left(\frac{\Delta \omega}{\omega}\right)^2 = \left[\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2\right],$$

$\nu = (50 \pm 0,5) \text{ Гц}$ .  $\Delta U = \frac{\gamma_U \cdot U_{\max}}{100}$ , и  $\Delta I = \frac{\gamma_I \cdot I_{\max}}{100}$ ,  $\gamma$  - классы точности измерительных приборов.

3.1.8 По формуле  $\Delta \bar{L} = \varepsilon \cdot \bar{L}$  вычислить абсолютную погрешность  $\Delta \bar{L}$  индуктивности катушки и записать ответ в виде:

$$L = (\bar{L} \pm \Delta \bar{L}) \text{ Гн}. \quad (14)$$

3.1.9 Снять верхнюю часть ферромагнитного сердечника 3 и повторить выполнение пунктов 3.1.4 ... 3.1.8.

3.1.10 Сравнить значения индуктивности  $L$  катушки, полученных при замкнутом и разомкнутом ферромагнитном сердечнике, сформулировать выводы. Результаты измерений и расчеты записать в таблицу 1.

## 4 Контрольные вопросы

- 4.1 В чем заключается явление электромагнитной индукции?
- 4.2 Сформулируйте закон Фарадея и правило Ленца.
- 4.3 В чем заключается явление взаимной индукции?
- 4.4 Принцип действия какого прибора основан на явлении взаимной индукции?
- 4.5 Что такое индуктивное сопротивление?
- 4.6 Какое физическое явление называется самоиндукцией?
- 4.7 Как выводится формула для определения э.д.с самоиндукции?
- 4.8 Какова физическая сущность индуктивности катушки, от чего она зависит?
- 4.9 Сравните полученные значения индуктивности катушки с перемычкой и без перемычки и поясните их различие.

## Лабораторная работа № 14

### Определение показателя преломления жидкостей рефрактометром

**Цель и задачи работы:** Ознакомление с основными законами геометрической оптики; изучение принципа действия рефрактометра и определение показателей преломления жидкостей; определение концентрации растворов по экспериментальному графику.

#### 1 Общие сведения

Показатель преломления является важнейшей оптической характеристикой жидкости, связан с ее химической структурой, с концентрацией раствора и ее плотностью.

Явление полного отражения света используется в призмах полного отражения. Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (жидких и твердых).

Явление полного отражения используется также в световодах, представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала. В волоконных кабелях применяется стеклянное волокно, сердцевина которого окружается оболочкой из материала с меньшим показателем преломления.

Свет, падающий на торец световода под углами, большими предельного, претерпевает на поверхности раздела сред полное отражение и распространяется только по световедущей жиле. Световоды используются в электронно-лучевых трубках, в электронно-вычислительных машинах, для кодирования информации, в медицине (например, для диагностики желудка), для целей интегральной оптики и т.д.

#### 2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из прибора рефрактометра, набора растворов с известной и неизвестной концентрациями, мягкой ткани или чистой ваты, настольной лампы.

Приборы рефрактометры позволяют быстро и точно определять показатели преломления жидких и некоторых твердых веществ.

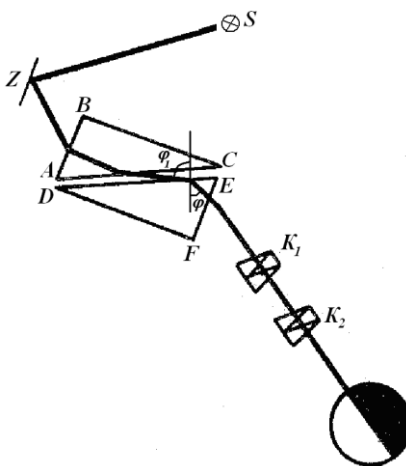


Рисунок 1 Оптическая схема призм рефрактометра:

$ABC$  – осветительная призма,  $DEF$  – измерительная призма ;  $S$ - источник света,  $Z$ - зеркало,  $K_1$  и  $K_2$  – призмы компенсатора дисперсии

В основе работы рефрактометра лежит явление обратное явлению полного внутреннего отражения, т.е. луч на границу двух сред направляют скольльзящим, угол падения  $\varphi_1$  близок к  $90^\circ$ , а преломленный луч имеет угол  $\varphi$  близкий к предельному (рисунок 1), тогда из закона преломления света

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi}$$

получим показатель преломления жидкости

$$n_1 = n_2 \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $n_2$  – показатель преломления стекла призмы, известная величина в данном приборе.

Основной частью прибора является призмный блок – две призмы  $ABC$  и  $DEF$ , изготовленные из стекла «флинт» с большим показателем преломления ( $n_2 = 1,72$ ). Призмы сложены «гипотенузами» и вмонтированы в полые кожухи. Верхнюю призму открывают, на нижнюю призму (измерительную) наносят пипеткой 2-3 капли исследуемой жидкости, затем верхнюю призму (осветительную) закрывают. Пучок световых лучей от источника света  $S$  направляется на грань  $AB$  призмы  $ABC$ .

Преломившись, лучи проходят призму и достигают грани  $AC$ . Так как эта грань матовая, то происходит рассеяние света. Лучи рассеянного света, пройдя через жидкость, падают на грань  $DE$  второй призмы под различными углами. Показатель преломления стекла больше показателя преломления жидкости, поэтому наибольший угол преломления в призме  $DEF$  будет предельным углом полного внутреннего отражения  $\varphi$ .

В поле зрения трубы будут наблюдаться две области: одна половина светлая, другая – темная. Положение границы светотени определяется величиной предельного угла, т.е. зависит от показателя преломления жидкости согласно формуле (1).

Оптическая схема рефрактометра показана на рисунке 2.

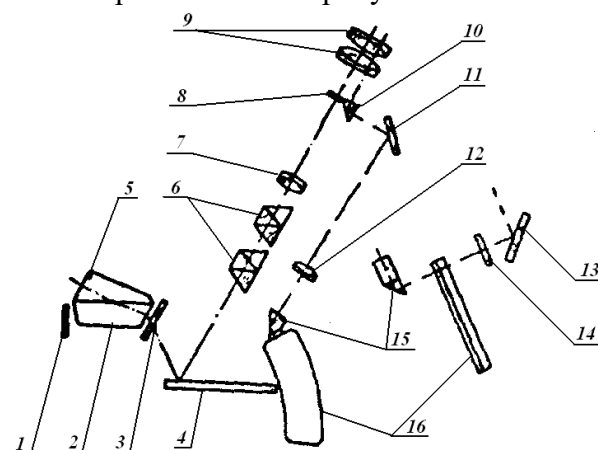


Рисунок 2 Оптическая схема рефрактометра ИРФ- 454:

1 – зеркало; 2 – призма измерительная; 3 – стекло защитное;

4 – зеркало; 5 – призма осветительная; 6 – компенсатор;

7 – линза склеенная; 8 – сетка; 9 – окуляр; 10 – призма  $AP-90^\circ$ ; 11 – зеркало; 12 – объектив; 13 – зеркало; 14 – светофильтр;

15 – призма; 16 – шкала

Поскольку показатель преломления стекла призмы  $n_2$  известен заранее, то шкалу рефрактометра градуируют непосредственно в значениях величины  $n_1$  с точностью до четвертого знака после запятой. Для разных длин волн света показатель преломления различен, поэтому при освещении белым (не монохроматическим) светом граница светотени будет окрашена в разные цвета, вследствие явления дисперсии света в призме. Для устранения дисперсии в зрительную трубу вмонтирован компенсатор, который состоит из двух призм прямого зрения  $K_1$  и  $K_2$  (рисунок 1) и 6 (рисунок 2).

Внешний вид прибора показан на рисунке 3.

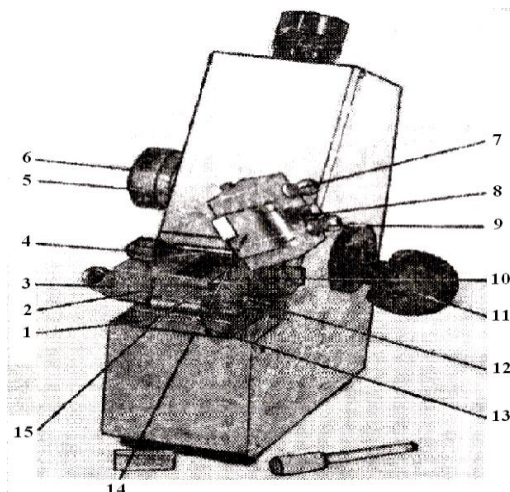


Рисунок 3 Внешний вид рефрактометра ИРФ – 454:

1, 13 – направляющие; 2 – блок рефрактометрический; 3 – измерительная призма; 4 – крючок; 5 – шкала; 6 – нониус; 7 – осветительная призма; 8 – рукоятка; 9, 12 – штуцеры; 10 – шарнир; 11, 15 – зеркала; 14 – заслонка

Призмы компенсатора дисперсии вращаются вокруг оптической оси в противоположные стороны и изменяют дисперсию от максимальной до нуля.

Показатель преломления прозрачных сред определяют в проходящем свете, а полупрозрачных и мутных – в отраженном.

При работе в отраженном свете измерительную призму 3 (рисунок 3) подсвечивают зеркалом 15. Так как показатель преломления исследуемого вещества (особенно жидкости) в значительной мере зависит от температуры, то при измерениях её необходимо поддерживать постоянной. Для этого предусмотрены камеры, через которые пропускают термостатированную воду. Подводят и отводят её резиновыми шлангами, надеваемыми на штуцеры 9, 12. Для контроля температуры в штуцер ввинчивают термометр.

Зеркало 11 служит для подсветки шкалы и имеет разворот в двух плоскостях. Окуляр может быть установлен на резкость в пределах  $\pm 5$  диоптрий.

Быстрее всего в рефрактометре выходят из строя призмы, поэтому следует соблюдать меры предосторожности при обращении с ними. Протирать поверхности призм следует чистой мягкой салфеткой. После измерений не оставлять раствор на призме, промыть дополнительно дистиллированной водой и просушить. Наносить жидкость следует каплями и не прикасаться пипеткой или шприцом к поверхности стекла.

При любой неисправности прибора необходимо поставить в известность преподавателя. Открывать и открывать силой подвижные части прибора строго запрещается.

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать законы геометрической оптики из учебников, указанных в библиографическом списке: /1/ С.302 – 304; /3/ С.430 – 435; /4/ С.76 – 91.

3.2 Открыть верхнюю призму 7 (рисунок 3) рефрактометра и нанести пипеткой на нижнюю призму 3 2-3 капли исследуемой жидкости, например, дистиллированной воды. Затем опустить откидную осветительную призму вплотную к нижней призме.

3.3 На окно осветительной призмы 7 направить свет от лампы (второе окно должно быть при этом закрыто заслонкой 14). Сфокусировать окуляр зрительной трубы и, вращая зеркало 11, добиться яркого освещения поля зрения и шкалы.

3.4 Вращая ручку компенсатора устранить окраску границы раздела.

3.5 Вращая ручку поворота призм, подвести визирный крест в поле зрения до совпадения с границей раздела светотени и по шкале отсчитать значение показателя преломления дистиллированной воды до четвертого знака после запятой.

3.6 Измерить показатели преломления нескольких растворов с известной концентрацией глюкозы  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и с неизвестной концентрацией  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$ .

3.7 Опыт повторить 3 раза, найти для каждой концентрации  $n$ , затем найти среднее  $\bar{n}$ , измеренные и рассчитанные величины записать в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерений показателя преломления

Обозначение физических величин							
Концентрация, $C, \%$	№ опыта	Вода 0 %	$C_1$ 5 %	$C_2$ 10 %	$C_3$ 15 %	$C_{x1}$	$C_{x2}$
Показатель преломления, $n$	1						
	2						
	3						
	Среднее						

3.8 На основании полученных данных построить график зависимости показателя преломления (средних значений) от концентрации растворов. График должен быть линейным (на миллиметровой бумаге размером не меньше  $15 \times 15$  см). Несовпадение точек с графиком возможно вследствие изменения концентрации раствора со временем из-за испарения воды или из-за осаждения части растворенного вещества.

3.9 Из графика  $n = f(C)$  найти неизвестную концентрацию  $C_x$  по его показателю преломления.

3.10 По разбросу точек около линейного графика определить наибольшее отклонение от графика  $\Delta C_x$  (экспериментальная погрешность).

3.11 Найти инструментальную погрешность концентрации, она пропорциональна погрешности показателя преломления:

$$\Delta C_x = k \Delta n,$$

где  $k$  – угловой коэффициент наклона графика.

Из технического паспорта рефрактометра ИРФ – 454 известно, что предел допускаемой основной погрешности показателя преломления  $\Delta n = \pm 2 \cdot 10^{-4}$  (инструментальная погрешность).

3.12 Записать окончательный результат в цифровом виде:

$$C_x = C_x \pm \Delta C_x,$$

где  $\Delta C_x$  – одна из погрешностей – инструментальная или экспериментальная – та, которая больше.

3.13 В отчете привести только рисунок оптической схемы призмного блока рефрактометра (рисунок 1).

#### 4 Контрольные вопросы

4.1 Что называется показателем преломления вещества, от чего он зависит?

4.2 Объясните законы отражения и преломления света.

4.3 В чем суть явления полного внутреннего отражения?

4.4 Как связан предельный угол преломления с относительным и абсолютным показателями преломления среды?

4.5 Начертите ход лучей в призмном блоке рефрактометра.

4.6 Почему при освещении белым светом граница раздела поля зрения становится радужной?

4.7 Почему одна половина поля зрения темная, а другая светлая?

4.8 Как с помощью рефрактометра можно определять концентрацию растворов?

4.9 Можно ли с помощью рефрактометра определить показатель преломления непрозрачных жидкостей?

## Лабораторная работа №15

### Изучение явления дифракции света на дифракционной решетке

**Цель и задача работы:** Изучение дифракции световых волн на одной щели и многих щелях (дифракционной решетке), определение длины световых волн видимого спектра с помощью дифракционной решетки.

#### 1 Общие сведения

Световые волны могут огибать препятствия и проникать в область геометрической тени. Это явление называется дифракцией света. Явление дифракции наблюдается также и среди волн другой природы – механических, звуковых и др., при условии, если размеры препятствий (отверстие, щель, прозрачный экран) соизмеримы с длиной волны.

Дифракционные картины нередко возникают в естественных условиях. Так, например, цветные кольца, окружающие источник света, наблюдаемый сквозь туман или через запотевшее оконное стекло, обусловлены дифракцией света на мельчайших водяных каплях. Дифракцией света ограничена разрешающая способность оптических приборов, т.е. способность этих приборов давать четкие, отдельные изображения мелких деталей предмета.

Дифракция используется в научно-исследовательских целях для изучения кристаллической структуры вещества при прохождении через вещество рентгеновских лучей (рентгенография), электронов (электронография), нейтронов (нейтронография). Восстановление голографического изображения объясняется также дифракцией лазерного луча на фотопластинке, на которой зарегистрирована голограмма. Гюйгенсом и Френелем был сформулирован принцип, объясняющий явление дифракции света, согласно которому каждая точка волнового фронта является источником вторичных когерентных волн, а испускаемые этими источниками волны впоследствии интерферируют между собой.

Широкое распространение в научном эксперименте и технике получили дифракционные решетки, предназначенные для разложения света в спектр и измерения длин волн. Дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которой остро отточенным алмазным острием нанесен ряд параллельных штрихов. Число их доходит до 2000 на 1 мм. Через промежутки между штрихами свет проходит, сами же штрихи, т.е. места, где стекло повреждено, являются непрозрачными для световых лучей. Ширину щели обозначим через  $a$ , ширину непрозрачной части экрана между двумя соседними щелями – через  $b$ . Величина  $d=a+b$  называется постоянной дифракционной решетки. За решеткой осуществляется многолучевая интерференция когерентных пучков света, исходящих от щелей решетки при ее освещении. Пусть на решетку перпендикулярно ее поверхности падает плоская монохроматическая волна. Разность хода  $\Delta$  между вторичными волнами, исходящими от соседних щелей решетки, будет  $d \sin \varphi = \Delta$ , а разность фаз

$$\delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi,$$

где  $\varphi$  - угол дифракции.

Интерференционная картина, наблюдаемая на экране Э (рисунок 1) представлена набором светлых полос различной интенсивности, разделенных темными промежутками.

Для получения на экране светлой полосы требуется, чтобы разность хода лучей равнялась  $\Delta = 2\frac{\lambda}{2}, 4\frac{\lambda}{2}, 6\frac{\lambda}{2} \dots, 2k\frac{\lambda}{2}$ , т.е. четному числу полуволн или целому числу длин волн:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (1)$$

где  $k$  – целое число ( $k=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ ), оно соответствует номеру светлой полосы, отсчитываемой

от центра картины. Величина  $k$  называется также порядком спектра.

Светлые полосы на экране называются главными максимумами. Для всех остальных точек экрана, для которых не соблюдается равенство (1), получатся темные полосы.

На рисунке 1 показан общий характер распределения интенсивности на четырех щелях ( $N=4$ ) дифракционной решетки.

Если щель будет одна, то распределение интенсивности будет иметь характер, показанный пунктирной линией. Минимумы, образованные одной щелью присутствуют и в картине от дифракционной решетки – это главные минимумы.

Рассмотренная выше картина относилась к дифракции монохроматического света на решетке. В белом свете каждая из волн различной длины дает свою дифракционную картину. Из условия максимума  $d \sin \varphi = k\lambda$  следует, что угол  $\varphi$  для фиксированного номера порядка  $k$  возрастает с увеличением  $\lambda$ .

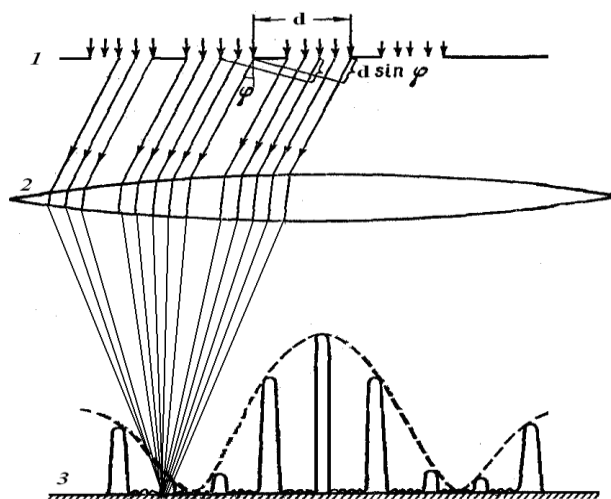


Рисунок 1 Ход лучей через дифракционную решетку и образование дифракционной картины: 1 – дифракционная решетка; 2 – линза; 3 – экран

В нулевом порядке центральный максимум ( $\varphi=0$ ) совпадает для всех волн. Поэтому в центре образуется белая полоса. Затем идет первый порядок, представленный всеми длинами волн видимого спектра – от фиолетового до красного, далее во втором и третьем порядках этот спектр повторяется, все более расширяясь и перекрывая друг друга. Наиболее четкое распределение спектральных полос можно увидеть при использовании источника, имеющего линейчатый спектр, например, свет ртутной или водородной ламп.

## 2 Описание лабораторной установки и вывод расчетной формулы

Установка по изучению дифракции света состоит из набора приборов (рисунок 2), размещенных на оптической скамье.

Осветительная лампа 2 размещена в фокусе линзы 3. Параллельный пучок лучей проходит через узкую щель с раздвижными краями 4, затем объектив 5 и дифракционную решетку 6. Расстояние между дифракционной решеткой и экраном можно изменять и измерять его величину линейкой 7. Отклоненные дифракционной решеткой лучи попадают на экран 8. Ход лучей за дифракционной решеткой показан на рисунке 3. Из прямоугольных треугольников  $SOA$  можно получить соотношение

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{2\ell}, \quad (2)$$

где  $l = SO$  – расстояние от дифракционной решетки до экрана,  $x = OA$  – расстояние от центра экрана до заданной полосы.

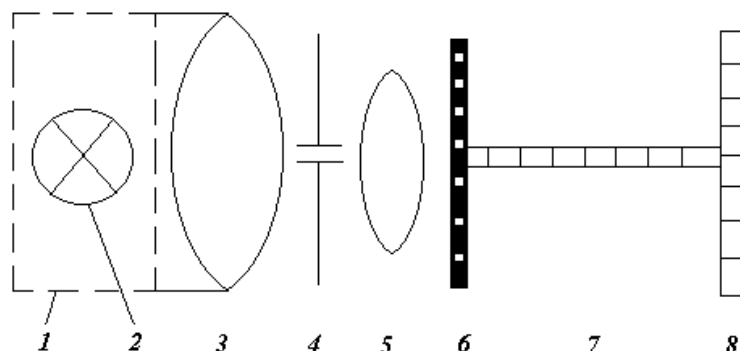


Рисунок 2 Установка для изучения дифракции света:

- 1 – защитный кожух; 2 – осветительная лампа;
- 3 – коллиматорная линза; 4 – раздвижная щель;
- 5 – объектив; 6 – дифракционная решетка;
- 7 – измерительная линейка; 8 – экран

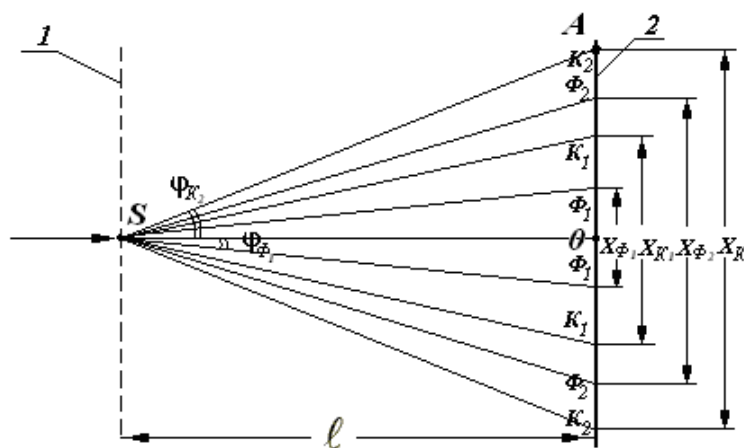


Рисунок 3 Ход лучей в установке:

- 1 – дифракционная решетка, 2 – экран

При  $\ell \gg x$  угол  $\varphi$  мал, поэтому в первом приближении можно принять, что  $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$ . Подставив выражение (2) в условие максимума дифракционной решетки (1), получим формулу для определения длины световой волны:

$$\lambda = \frac{x \cdot d}{2k \cdot \ell}, \quad (3)$$

где  $x$  – расстояние между красными или между фиолетовыми полосами в спектре одного порядка (соответственно  $x_k$  или  $x_\phi$ ), м;  $k$  – порядок спектра, отсчитываемый от центральной белой полосы;  $d$  – постоянная дифракционной решетки,  $d=0,01 \text{ мм}=10^{-5} \text{ м}$  (на 1 мм длины нанесено 100 штрихов);  $\ell$  – расстояние от дифракционной решетки до экрана, м.

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и составить конспект по



теме «Дифракция света» по одному из учебников, указанных в библиографическом списке:

- для инженерных специальностей С.331 – 341 /1/, С.436 – 447 /2/, С.134 – 173 /4/;
- для неинженерных специальностей С.470 – 480 /3/.

3.2 Включить осветительную лампу.

3.3 С помощью регулировочного рычага (или винта) установить ширину щели около 5 мм.

3.4 Расстояние от щели до дифракционной решетки должно быть не более 10 см.

3.5 Поместить подвижный экран 8 на расстояние 25...30 см от дифракционной решетки.

3.6 Добиться наиболее яркого спектра на экране 8.

3.7 Измерить расстояние между фиолетовыми полосами  $x_\phi$  и между красными полосами  $x_k$  в спектрах первого порядка ( $k=1$ ) (рисунок 3). Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

3.8 Измерить  $x_\phi$  и  $x_k$  в спектрах второго порядка ( $k=2$ ).

3.9 Переместить подвижный экран 8 на расстояние 40...50 см от дифракционной решетки и измерить  $x_\phi$  и  $x_k$  в первом и во втором порядках спектра.

3.10 По формуле (3) рассчитать длину волны  $\lambda_\phi$  и  $\lambda_k$  в четырех опытах, затем найти средние  $\bar{\lambda}_\phi$  и  $\bar{\lambda}_k$ .

3.11 Найти абсолютные погрешности  $\Delta\lambda_i$  для каждого измерения  $\Delta\lambda_i = |\bar{\lambda} - \lambda_i|$ , затем вычислить квадраты  $(\Delta\lambda^2)_i$ , по которым рассчитывается среднее квадратическое:

$$S_{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\Delta\lambda^2)_i}{4(4-1)}}.$$

. Измеренные и вычисленные значения внести в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерений расстояний и определения  
длин световых волн

Обозначения физических величин										
№ опыта	$d, \text{м}$	$k$	$\ell, \text{м}$	$x_\phi, \text{м}$	$x_k, \text{м}$	$\lambda_\phi$ нм	$\Delta\lambda_\phi$ нм	$(\Delta\lambda_\phi^2)_i$	$\lambda_k$ нм	$\Delta\lambda_k$ нм
1										
2										
3										
4										
среднее										

3.12 По таблицам Стьюдента (Приложение А) для четырех опытов ( $N = 4$ ) и доверительной вероятности  $P = 0,95$  найти коэффициент  $t_{P,N}$ .

Найти границы доверительного интервала

$$\Delta(\bar{\lambda}) = S_{\bar{\lambda}} \cdot t_{P,N} \quad (4)$$

и относительную  $\varepsilon_{\bar{\lambda}}$  погрешность (%):

$$\varepsilon_{\bar{\lambda}} = \frac{\Delta(\bar{\lambda})}{\bar{\lambda}}.$$

3.13 Для сравнения точности эксперимента (4) и точности инструментов провести расчет инструментальной погрешности  $\Delta\lambda$ . Максимальные погрешности определения  $x$  и  $\ell$  по миллиметровой линейке  $\Delta x = \Delta \ell = 1 \text{ мм}$  (им соответствует доверительная вероятность 0,997). Для косвенных измерений длин волн расчет погрешности провести по формуле:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda_k}{\lambda_k} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2},$$

затем найти абсолютную инструментальную погрешность:

$$\Delta\lambda_k = \varepsilon_{\lambda} \cdot \lambda_k. \quad (5)$$

Сравнить эту инструментальную погрешность (5) с экспериментальной (4). Из них взять ту, которая больше, и записать окончательный результат.

3.14 Окончательный результат выразить в нанометрах ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ) и представить числовой результат в виде:

$$\lambda_{\phi} = (\bar{\lambda}_{\phi} \pm \Delta\lambda_{\phi})_{\text{нм}},$$

$$\lambda_k = (\bar{\lambda}_k \pm \Delta\lambda_k)_{\text{нм}}.$$

3.15 Сделать вывод. Сравнить найденные длины волн  $\lambda_{\phi}$  и  $\lambda_k$  с видимым диапазоном шкалы электромагнитных волн.

## 4 Контрольные вопросы

5.1 Какие волны называются когерентными?

5.2 Сформулировать принцип Гюйгенса-Френеля.

5.3 Что такое зона Френеля и как объяснить дифракцию на одной щели с помощью зон Френеля?

5.4 Как происходит дифракция на двух и более щелях?

5.5 В чем суть графического метода сложения амплитуд?

5.6 От чего зависит разрешающая способность дифракционной решетки и как ее определить в данной лабораторной работе?

5.7 Чем отличается дифракционный спектр, полученный от решетки, от спектра, полученного с помощью призмы?

5.8 Почему центральная полоса в дифракционной картине получается белой, в то время как полосы первого и второго порядков – радужные?

5.9 Для чего применяются дифракционные решетки?

5.10 Почему нельзя построить микроскоп на линзах для наблюдения атомов и молекул?

## Лабораторная работа №16

### Определение концентрации глюкозы в растворе по углу вращения плоскости поляризации

**Цель и задача работы.** Изучение явлений поляризации света и вращения плоскости поляризации, определение концентрации глюкозы в водном растворе с помощью поляриметра.

#### 1 Общие сведения

Поляризация света – свойство света, проявляющееся в пространственно–временном упорядочении векторов напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей электромагнитных волн.

Применение поляризации света весьма разнообразно: исследование строения кристаллов, плавное изменение и регулировка интенсивности световых потоков, светоблокировка, высокочастотная модуляция света в оптических счетных машинах, сахариметрия, метод фотоупругости, применяемый для изучения распределения механической нагрузки в прозрачных моделях деталей машин и в строительстве и др.

Согласно волновой теории свет представляет собой поперечные электромагнитные волны. Реальные источники света содержат множество возбужденных атомов, излучающих по данному направлению волны, плоскости колебаний которых произвольно ориентируются в пространстве. Свет, в котором наблюдаются различные ориентации плоскости колебаний, называется естественным светом (рисунок 1а). А свет, в котором колебания вектора  $\vec{E}$  совершаются в одной плоскости, называется линейно - поляризованным светом (рисунок 1в). На рисунке 1б показано расположение векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в частично поляризованном свете. Фотохимическое, физиологическое и фотоэлектрическое действие оказывает электрическое поле, поэтому вектор  $\vec{E}$  считается более важным. В дальнейшем мы не будем упоминать о магнитном поле, хотя оно неотделимо от электрического в электромагнитной волне и всегда вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен вектору напряженности электрического поля.

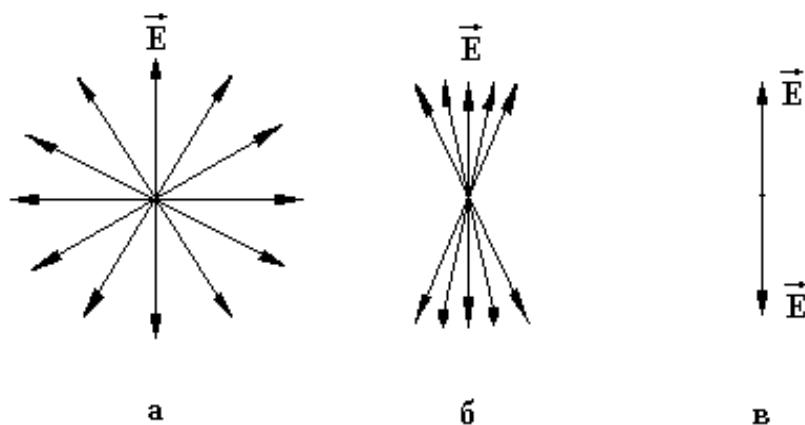


Рисунок 1 Изображения направлений векторов  $\vec{E}$  в пучке электромагнитных волн: а – естественном; б - частично поляризованном и в - линейно поляризованном свете

Устройства, при помощи которых естественный свет превращается в поляризованный, называются поляризаторами.

В качестве поляризаторов часто используются призмы Николя. Призма Николя вырезается из кристалла исландского шпата. Грани и углы призмы имеют определенные размеры (рисунок 2).

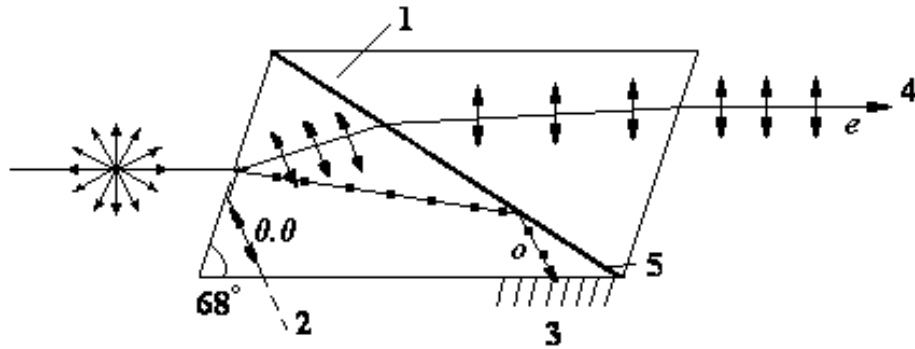


Рисунок 2 Ход лучей в призме Николя: 1 – кристалл исландского шпата, 2 – оптическая ось кристалла, 3 – обыкновенный луч (*o*), 4 – необыкновенный луч (*e*), 5 – склеивающий слой канадского бальзама

В призме распространяются две волны по разным направлениям. Обе волны поляризованы, но поляризованы они во взаимно перпендикулярных плоскостях. Один луч – обыкновенный (*o*), для него выполняется закон преломления света. Показатель преломления исландского шпата  $n_o$  для обыкновенного луча постоянен ( $n = 1,66$ ). Другой луч – необыкновенный (*e*), он не подчиняется закону преломления, показатель преломления  $n_e$  зависит от угла падения естественного света на грань призмы. Для показателей преломления  $n_k$ ,  $n_o$  и  $n_e$  выполняется условие:

$$n_o > n_k > n_e ,$$

где  $n_k$  – показатель преломления склеивающего слоя (канадского бальзама).

Обыкновенный луч, падая на слой клея, испытывает полное отражение и поглощается затемненной гранью призмы. Необыкновенный луч, преломившись, проходит через призму (рисунок 2).

Причиной двойного лучепреломления является анизотропия поляризуемости молекул, которая ведет к тому, что диэлектрическая проницаемость, а, значит, и показатели преломления среды будут различны для разных направлений электрического вектора световой волны в кристалле.

В учебных лабораториях для получения линейно поляризованного света используются доступные и дешевые приборы – поляроиды, в которых происходит явление оптического дихроизма, т.е. различного поглощения обыкновенного и необыкновенного лучей. Из поляроида выходит свет, поляризованный в одной плоскости, совпадающей с главной плоскостью поляроида.

Если на пути распространения поляризованного света, вышедшего из поляроида 1 (поляризатор), расположить поляроид 2 (анализатор), то можно определить степень поляризации света, падающего на анализатор (рисунок 3).

Через анализатор пройдут только колебания с амплитудой:

$$E_1 = E_o \cdot \cos \alpha .$$

Другая часть -  $E_2 = E_o \sin \alpha$  поглотится анализатором.

Интенсивность  $J$  световой волны равна энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны.  $J$  пропорциональна квадрату амплитуды  $E^2$ , можно перейти к закону Малюса:

$$J = J_0 \cos^2 \alpha ,$$

где  $J$  – интенсивность света, вышедшего из анализатора,  $J_0$  – интенсивность света, падающего на анализатор,  $\alpha$  – угол между главными сечениями поляризатора и анализатора.

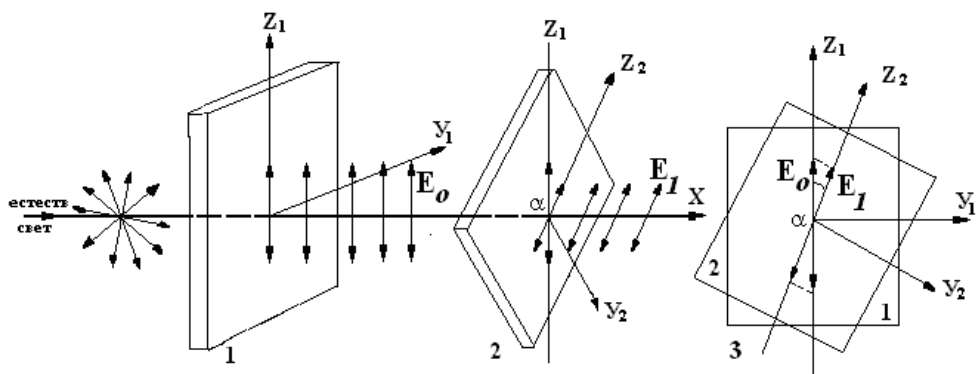


Рисунок 3 Схема опыта для проверки закона Малюса: 1 - поляризатор; 2 - анализатор; 3 - изображение векторов  $E_o$  и  $E_I$  в плоскости чертежа

Опытным путем было установлено, что при пропускании поляризованного света через некоторые вещества, плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  поворачивается на некоторый угол  $\varphi$ . Это явление называется вращением плоскости поляризации (рисунок 4).

Такие вещества называются оптически активными.

Явление вращения плоскости поляризации было открыто французским физиком Д.Араго (1811г.) в твердом кварце.

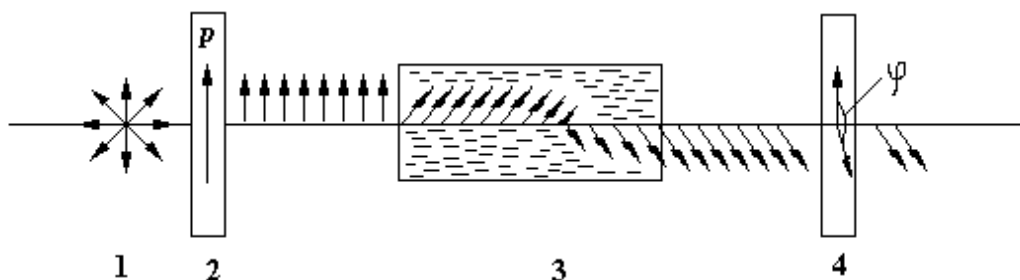


Рисунок 4 Схема установки для изучения вращения плоскости колебаний вектора  $\vec{E}$ : 1 – источник естественного света; 2 – поляризатор; 3 - кювета с веществом; 4 – поляризатор – анализатор

Кварц является одноосным кристаллом. В настоящее время известны тысячи активных веществ как твердых (киноварь, сахар, кристаллы  $NaClO_3$ ,  $NaBrO_3$ ), так и жидких (скипидар, водные растворы сахара, глюкозы и др.) Причем активные вещества существуют в двух модификациях – левовращающие и правовращающие.

Для растворов французский ученый Ж.Био (1831г.) установил на опыте следующий количественный закон: угол поворота плоскости поляризации  $\varphi$  прямо пропорционален толщине  $l$  слоя раствора и концентрации  $C$  активного вещества:

$$\varphi = [\alpha] l C ,$$

где  $[\alpha]$  - коэффициент удельного вращения.

Коэффициент вращения зависит от природы вещества и температуры, а также может меняться при смене растворителя.

Для растворенных веществ вращение – это молекулярное свойство, угол вращения возрастает пропорционально числу молекул на пути луча света; аналогично наблюдается вращение и в аморфных телах, состоящих из тех же молекул (сахарные леденцы, например) и в парах соответствующих жидкостей (например, парах скипидара или камфары). Вращательная

способность характеризует и многие кристаллы. В некоторых случаях вращательная способность связана именно с кристаллической структурой и не является свойством самих молекул. Так, плавленый (аморфный) кварц не вращает плоскость поляризации, тогда как кристаллический кварц принадлежит к числу наиболее активных веществ. Таким образом, оптическая активность может определяться как строением молекулы, так и расположением молекул в кристаллической решетке.

## 2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из поляриметра СМ-1 и нескольких трубок с исследуемыми растворами глюкозы.

На явлении вращения плоскости поляризации основан метод определения концентрации глюкозы или сахара в растворах. Этот метод назван поляризацией, а приборы – поляриметрами.

Поляриметры находят широкое применение в медицине для определения сахара в моче, в биофизических исследованиях, в пищевой промышленности, в агрономических исследованиях семян и качества сельскохозяйственной продукции. Поляризацию применяют в научных исследованиях – уменьшение или увеличение угла вращения плоскости поляризации свидетельствует об изменении структуры молекул исследуемых веществ.

Поляриметр типа СМ-1 предназначен для измерения угла вращения плоскости поляризации оптически активными прозрачными однородными растворами. Схематически общий вид поляриметра СМ-1 представлен на рисунке 5а, а принципиальная оптическая схема – на рисунке 5б.

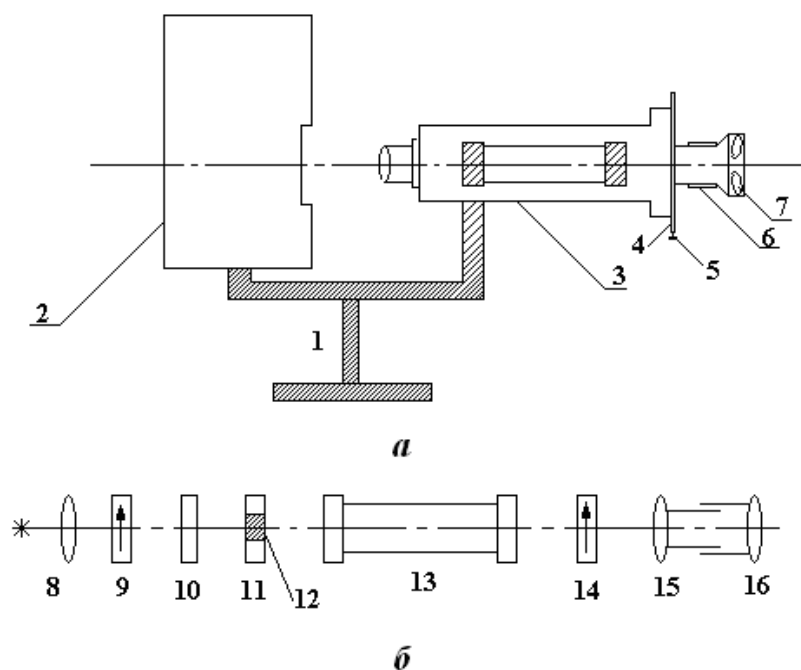


Рисунок 5 Поляриметр СМ-1: а – общий вид; б – принципиальная оптическая схема; обозначения на схеме: 1 – основание корпуса; 2 – осветитель; 3 – кюветное отделение с закрывающейся крышкой; 4 – лимб с измерительной шкалой; 5 – ручка вращения лимба; 6 – муфта для наводки на резкость; 7 – увеличительные линзы для отсчета со шкалы лимба; 8 – линза – коллиматор; 9 – поляризатор; 10 – желтый светофильтр; 11 – диафрагма; 12 – кварцевая пластинка; 13 – кювета со стеклянными окнами по торцам трубки; 14 – анализатор; 15 – объектив; 16 – подвижный окуляр

Для отсчета углов на вращающемся диске имеется круговая шкала 4 с нониусом, деления которого наблюдаются через две небольшие лупы 7, помещенные на оправе окуляра. Кварцевая пластинка 12 в диафрагме 11 (свет, прошедший через неё, падает на среднюю часть поля зрения)

обеспечивает дополнительный поворот плоскости колебаний вектора  $\vec{E}$  света на угол  $\beta = 5 \div 7^\circ$  (рисунок 6), необходимый для полутеневого отсчета.

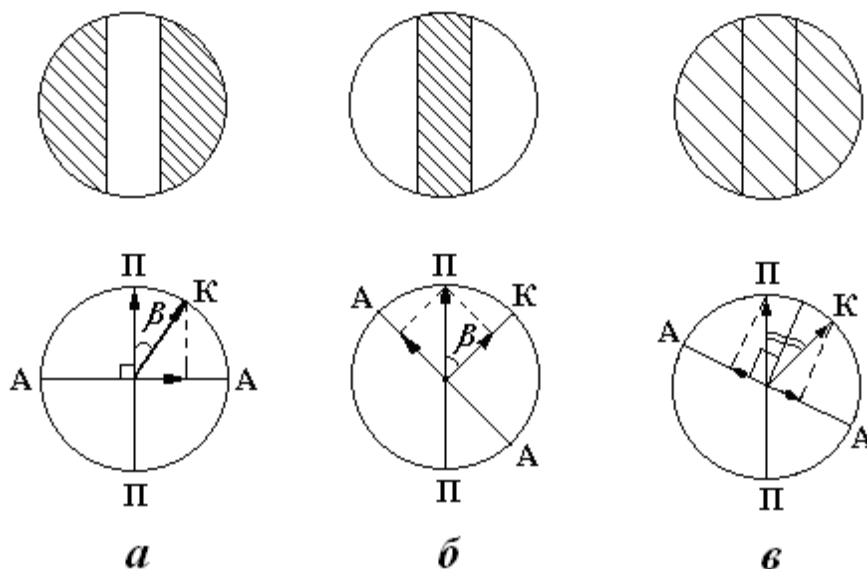


Рисунок 6 Поле зрения поляриметра: *а* и *б* - крайние случаи освещенности, *в* - равномерное затемнение и соответствующие положения плоскостей пропускания вектора  $\vec{E}$  поляризатором (П), анализатором (А) и кварцевой пластинкой (К)

Отсчет угла производится по уравниванию яркостей трех частей поля зрения.

Вследствие адаптации глазом трудно оценивать полное затемнение поля зрения, однако глаз весьма чувствителен к разнице яркостей граничащих частей поля зрения. Это используется в приборе с полутеневым отсчетом, такое освещение не утомляет глаза.

В поляриметре типа СМ-1 поле зрения разделено на три части (рисунок 6). Причем средняя часть светового потока после поляризатора 9 (рисунок 2) проходит через кварцевую пластинку 12, так что освещенность боковых частей поля зрения может отличаться от освещенности средней её части. Вращение диска 4 (рисунок 5а) совмещенного с анализатором 14, позволяет получить равномерно затемненное поле (рисунок 6 в), при котором следует производить отсчет угла по лимбу.

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и составить конспект по теме «Вращение плоскости поляризации» из учебников, рекомендованных в библиографическом списке: /1/ С.367 – 368; /2/ С.475 – 476; /3/ С.493 – 495; /4/ С.213 – 215.

3.2 Убедиться в том, что в кюветном отделении отсутствует кювета с жидкостью.

3.3 Включить лампу поляриметра в сеть ( $U = 220$  В).

3.4 Поворотом корпуса поляриметра относительно лампы найти наибольшее освещение поля зрения.

3.5 С помощью муфты 6 (рисунок 2а) добиться четкой видимости поля зрения.

3.6 Вращением ручки 5 добиться равенства яркостей полей сравнения (равномерно затемненные поля) и произвести измерения угла  $\varphi$  следующим образом: определить, на сколько градусов повернута шкала лимба относительно нуля нониуса, а затем к полученному числу

градусов прибавить десятые и сотые доли, отсчитанные по нониусу. Установку на равную яркость полей сравнения и измерение угла повторить 3 раза и вычислить среднее арифметическое угла  $\bar{\varphi}_0$ , записать все измерения в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты измерения угла поворота плоскости поляризации

Наименование физических величин				
Концентрация $C$ , %	Номер опыта	Угол поворота $\varphi$ , град	$\bar{\varphi}$ , град	Коэффициент удельного вращения $[\alpha]$
0	1			
	2			
	3			
5	1			
	2			
	3			
$C_2$	1			
	2			
	3			

3.7 Установить трубку с раствором глюкозы известной концентрации  $C_1$  в кюветное отделение. Проверить четкость изображения втулкой 6. Медленным поворотом ручки 5 добиться равномерно затемненного поля. Произвести измерение угла  $\varphi_1$ . Таких повторов наводок сделать  $i = 3$  и найти среднее арифметическое значение угла  $\bar{\varphi}_1$ .

3.8 Поместить в кюветное отделение трубку с раствором неизвестной концентрации глюкозы  $C_2$ . провести вышеуказанные операции по наводке на резкость и получение равномерно затемненного поля. Измерить угол  $\bar{\varphi}_2$ .

3.9 Измерить линейкой длину трубки  $l$  (трубки стандартные имеют длину 0,1 м или 0,2 м).

3.10 Зная концентрацию раствора  $C_1$  и длину трубки  $l$ , рассчитать коэффициент удельного вращения сахара:

$$[\alpha] = \frac{\bar{\varphi}_1 - \bar{\varphi}_0}{C_1 \cdot l} \cdot \left( \frac{\text{град}}{\% \cdot \text{м}} \right). \quad (1)$$

3.11 Рассчитать неизвестную концентрацию  $C_2$  по формуле:

$$C_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} \cdot C_1. \quad (2)$$

3.12 Провести оценку погрешностей – относительной и абсолютной по формуле:

$$\varepsilon_{C_2} = \frac{\Delta C_2}{C_2} = \sqrt{\left( \frac{\Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \varphi_2 + \Delta \varphi_0}{\varphi_2 - \varphi_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_1}{C_1} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta \varphi_1$ ,  $\Delta \varphi_0$  и  $\Delta \varphi_2$  – абсолютные погрешности измерения углов (в случае полного повторения опытов, погрешность угла следует взять по нониусу, т.е.  $\Delta \varphi = 0,05^\circ$ , инструментальную погрешность);



$\Delta C_1$  – абсолютная погрешность известной концентрации должна быть указана на этикетке трубки и составляет не более 0,2 %.

Из формулы (3) следует найти абсолютную погрешность :

$$\Delta C_2 = C_2 \cdot \varepsilon_c.$$

3.13 Записать результат работы в числовой форме:

$$C = (C_2 \pm \Delta C_2) \%, \quad \varepsilon_c = \frac{\Delta C_2}{C_2}, \quad \%.$$

3.14 В конце отчета следует написать выводы.

#### 4 Контрольные вопросы

- 4.1 Что представляет собой свет с точки зрения электромагнитной теории?
- 4.2 Запишите уравнение световой волны.
- 4.3 Какой свет называется естественным, а какой – поляризованным?
- 4.4 Сформулируйте закон Малюса, (поясните роль анализатора и поляризатора).
- 4.5 Какие вещества называются оптически активными?
- 4.6 Как записывается закон Био для вращения плоскости колебаний поляризованного света?
- 4.7 От чего зависит угол поворота плоскости поляризации оптически активных веществ?
- 4.8 Объясните назначение и принцип действия поляриметра?

## Лабораторная работа №17

### Изучение законов теплового излучения

**Цель и задачи работы:** Изучение законов теплового излучения, устройства оптического пирометра, определение температуры нагретого тела и постоянной Стефана – Больцмана.

#### 1 Общие сведения

Тепловым (или температурным) излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое телами за счет их внутренней энергии, т.е. за счет движения атомов и молекул вещества. Оно свойственно всем телам при любой температуре выше нуля Кельвина.

Для количественной оценки теплового излучения вводятся следующие характеристики:

1) Энергетическая светимость или полная излучательная способность  $R_T$  – это энергия  $W$ , излучаемая с единицы площади поверхности  $S$  излучаемого тела по всем направлениям за единицу времени  $t$  при данной температуре  $T$ :

$$R_T = \frac{W_{изл}}{S \cdot T \cdot t}. \quad (1)$$

2) Спектральная излучательная способность или спектральная плотность энергетической светимости  $R_{\lambda T}$  – это количество энергии  $dW$ , в узком интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , испускаемой за единицу времени по всем направлениям с единицы площади поверхности  $S$  тела, имеющего температуру  $T$ :

$$R_{\lambda, T} = \frac{dW_{изл}}{S \cdot T \cdot t \cdot d\lambda}. \quad (2)$$

3) Спектральная поглощательная способность  $A_{\lambda, T}$  – величина, показывающая, какая часть энергии излучения с длиной волны  $\lambda$ , достигающая за единицу времени площади поверхности тела, имеющего температуру  $T$ , поглощается им (коэффициент поглощения):

$$A_{\lambda T} = \frac{W_{погл}}{W_{над}}. \quad (3)$$

В теории теплового излучения вводится понятие – абсолютно черное тело – тело, которое полностью поглощает весь падающий на него поток излучения. Коэффициент поглощения абсолютно черного тела  $A_{\lambda, T}^{черн}$  равен единице. В природе абсолютно черных тел нет, наиболее близким приближением к абсолютно черному телу является модель в виде непрозрачного сосуда сферической формы, стенки которого имеют одинаковую температуру.

Экспериментально установлено несколько законов теплового излучения:

1) Закон Кирхгофа. Отношение излучательной способности  $R_{\lambda T}$  тел к их поглощательной способности  $A_{\lambda T}$  не зависит от природы тел, а зависит от температуры тел и от длины волны излучения и равно излучательной способности абсолютно черного тела  $r(\lambda, T)$ :

$$\frac{R'_{\lambda, T}}{A'_{\lambda, T}} = \frac{R''_{\lambda, T}}{A''_{\lambda, T}} = \frac{R'''_{\lambda, T}}{A'''_{\lambda, T}} = \dots = r(\lambda, T). \quad (4)$$

Энергетической светимостью  $R_T$  абсолютно черного тела называется количество энергии, излучаемой с единицы площади за единицу времени для всех длин волн:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda. \quad (5)$$

2) Закон Стефана-Больцмана. Энергетическая светимость абсолютно черного тела  $R_T$  прямо пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры

$$R_T = \sigma T^4, \quad (6)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  – постоянная Стефана-Больцмана.

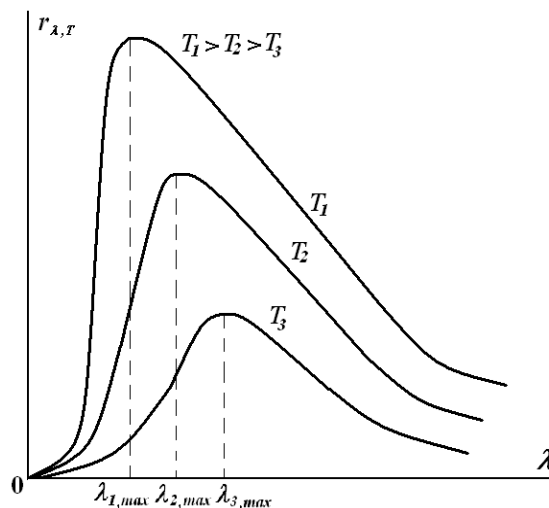


Рисунок 1 Спектр излучения абсолютно черного тела

3) Закон Вина (закон смещения). Длина волны  $\lambda_{max}$ , на которую приходится максимум излучательной способности, обратно пропорциональна термодинамической температуре абсолютно черного тела:

$$\lambda_{max} = \frac{b_1}{T}, \quad (7)$$

где  $b_1 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

## 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Для выполнения данной лабораторной работы используются пирометр, источник теплового излучения (лампа накаливания), амперметр, вольтметр, калибровочный график.

Законы излучения абсолютно черного тела используются при измерении температуры раскаленных и самосветящихся тел (например, расплавленного металла в доменных печах, звезд). Методы измерения высоких температур, использующие законы теплового излучения, называются оптической пирометрией.

Приборы, предназначенные для измерения температуры нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра, называются пирометрами. В зависимости от того, какой закон теплового излучения используется при измерении температуры тел, различают радиационную, цветовую и яркостную температуру. Так как интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел, методы пирометрии применяют для измерения сравнительно высоких температур. При  $T < 1000^\circ\text{C}$  они играют второстепенную роль, при  $T > 1000^\circ\text{C}$  становятся главными, а при  $T > 3000^\circ\text{C}$  практически единственными методами измерения температуры. Связано это с тем, что методы пирометрии не требуют контакта датчика измерительного прибора с телом, температура которого измеряется. Основное условие применимости методов пирометрии – излучение тела должно быть чисто тепловым, т.е. должно подчиняться закону излучения Кирхгофа.

В настоящей работе измерение температуры тела проводится при помощи яркостного пирометра с исчезающей нитью, обеспечивающего наибольшую точность в диапазоне температур от  $10^3$  до  $10^4$  К. Этот метод основан на визуальном сравнении монохроматических яркостей эталона и изображения раскаленного тела (вольфрамовой спирали лампы накаливания).

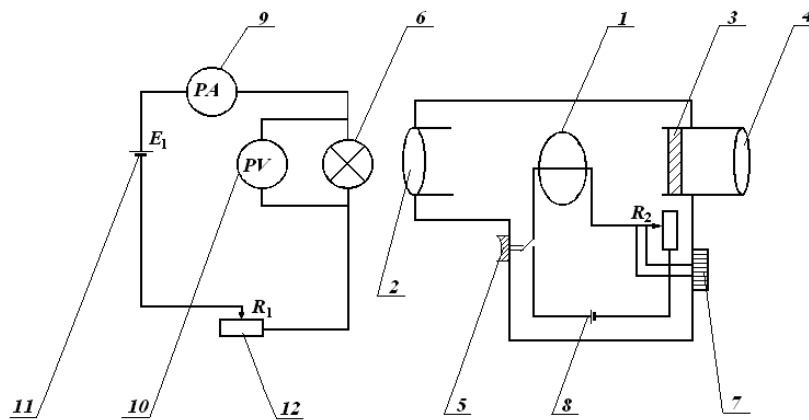


Рисунок 2 Оптическая и электрическая схема установки:

1- пиromетрическая лампа; 2- объектив; 3- светофильтр; 4-окуляр; 5-кнопка включения пиromетра; 6-исследуемая лампа; 7-ручка регулировки накала лампы пиromетра; 8-аккумулятор; 9-амперметр; 10- вольтметр; 11-источник тока в цепи лампы накаливания; 12-регулятор тока

В качестве эталона яркости в оптическом пиromетре используется пиromетрическая лампа 1 (рисунок 2), для которой известна зависимость температуры нити от тока, протекающего по ней.

Изображение источника излучения 6, температуру которого хотят измерить, с помощью объектива 2 проецируется в плоскости пиromетрической лампы 1. Наблюдатель, смотрящий в окуляр 4, видит нить пиromетрической лампы на фоне спирали лампы накаливания. Регулируя ток накала лампы пиromетра регулятором  $R_2$ , можно добиться того, что она станет одинаковой яркости с исследуемой нитью и перестанет быть видимой на фоне спирали, т.е. «исчезает». В этом режиме и следует определить температуру по шкале прибора.

Так как исследуемая нить не является абсолютно черной, то найденная таким образом температура тела  $T_{ЯРК}$  всегда ниже ее истинной термодинамической температуры, так как любое тело излучает меньше энергии, чем абсолютно черное тело при той же температуре (согласно закону Кирхгофа). Для того, чтобы определить истинную температуру, нужно учесть поправку  $\Delta T$ , тогда

$$T_{ИСТ} = T_{ЯРК} + \Delta T. \quad (8)$$

На рисунке 3 представлена зависимость поправки  $\Delta T$  от температуры  $T_{ЯРК}$ .

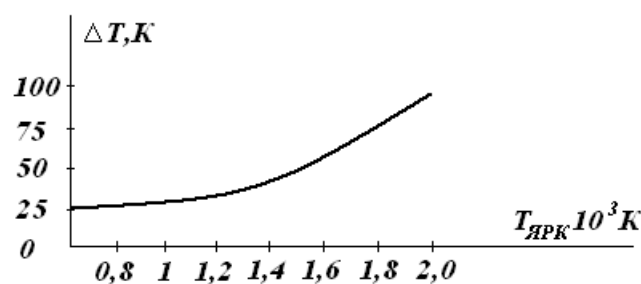


Рисунок 3 Зависимость температурной поправки  $\Delta T$  от яркостной температуры

По закону Стефана-Больцмана для серого тела энергетическая светимость:

$$R_T = a_T \cdot \sigma T^4, \quad (9)$$

где  $a_T$  – коэффициент поглощения (для вольфрама  $a_T=0,45$ ).

Мощность излучения тела, имеющего температуру  $T$  в среде с температурой  $T_0$ :

$$N_1 = R_T \cdot S = a_T \cdot \sigma (T^4 - T_0^4) \cdot S, \quad (10)$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности (для лампы в данной лабораторной установке  $S = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ).

На поддержание накала нити лампы затрачивается мощность:

$$N_2 = I \cdot U, \quad (11)$$

где  $I$  – сила тока,  $A$ ;

$U$  – напряжение,  $B$ .

При равновесной температуре нити (т.е.  $T = const$ )

$$N_1 = N_2, \quad (12)$$

поэтому

$$a_T \cdot \sigma(T^4 - T_0^4) \cdot S = I \cdot U.$$

Отсюда получим выражение для постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{I \cdot U}{a_T \cdot S(T^4 - T_0^4)}. \quad (13)$$

Поскольку  $T^4 < T_0^4$ , то можно приближенно записать:

$$\sigma = \frac{I \cdot U}{a_T \cdot S \cdot T^4}. \quad (14)$$

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

3.1 При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С.498-501; /2/ С.369-376; /3/ С. 9-30; /4/ С.478-488.

3.2 Изучить электрическую схему установки (рисунок 2).

3.3 Подготовить оптический пирометр к работе: проверить положение стрелки пирометра на нуле, поставить на окуляре 4 красный светофильтр 3. Нажать на кнопку 5 (рисунок 2) на рукоятке пирометра и, глядя в окуляр, увидеть раскаленную горизонтальную нить пирометра и навести на резкое её изображение шайбой окуляра.

3.4 Включить цепь исследуемой лампы.

3.5 Вращением ручки 7 (рисунок 2) и потенциометра  $R_I$  блока питания установить ток в цепи (по заданию преподавателя).

3.6 Навести окуляр на нить исследуемой лампы и вращением кольца объектива добиться четкого изображения нити. Изображение обеих нитей должно быть одинаково четким (рисунок 4).

3.7 Вращением рукоятки 7 (рисунок 2) пирометра добиться совпадения яркостей нити пирометрической лампы и изображения исследуемой спирали.

3.8 Записать показания амперметра, вольтметра и пирометра в таблицу 1.

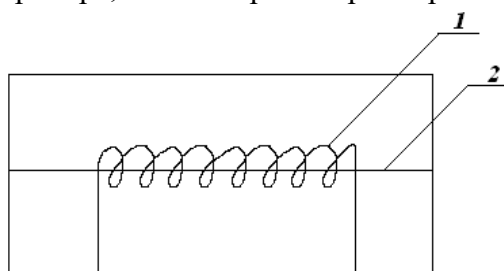


Рисунок 4 Поле зрения окуляра: 1 – нить исследуемой лампы;  
2 – нить пирометрической лампы

3.9 Установить другое значение силы тока в цепи исследуемой лампы (всего должно быть не менее 3-х опытов). Определить температуру исследуемой спирали в каждом опыте. Перевести температуру из шкалы Цельсия в шкалу Кельвина.

3.10 По графику поправок найти  $\Delta T$ , затем по формуле (8) температуру  $T_{ист}$  (график поправок имеется в лаборатории).

3.11 По формуле (14) вычислить значения постоянной Стефана-Больцмана.

3.12 Определить среднее значение  $\bar{\sigma}$ , его среднюю экспериментальную абсолютную погрешность  $\Delta \bar{\sigma}$  и среднюю квадратичную погрешность  $S_{\sigma} = 1,25 \Delta \bar{\sigma}$ . По таблице А1,

приведенной в приложении А, для  $n = 3$  и доверительной вероятности  $P = 0,997$  найти коэффициент  $t_{P,n}$  определить доверительный интервал  $\Delta\sigma$ .

3.13 Оценить погрешности приборов:  $\Delta I$ ,  $\Delta U$  по классу точности амперметра и вольтметра, соответственно. Величину  $\Delta T$  найти как половину цены наименьшего деления шкалы пирометра.

3.14 Рассчитать инструментальную относительную погрешность для первого опыта по формуле:

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma^*}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta T}{T}\right)^2}. \quad (15)$$

3.15 Из выражения (15) найти абсолютную инструментальную погрешность

$$\Delta\sigma^* = \varepsilon_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}.$$

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений

№ опыта	Обозначения физических величин								
	$I, A$	$U, B$	$T, ^\circ C$	$T_{ЯРК}, K$	$T_{ИСТ}, K$	$T, K$	$\sigma, Bm/m^2 \cdot K^4$	$\bar{\sigma}, Bm/m^2 \cdot K^4$	$\Delta\sigma, Bm/m^2 \cdot K^4$
1									
2									
3									

3.16 Окончательный результат работы записать в виде:

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma,$$

где  $\Delta\sigma$  – одна из двух погрешностей  $\Delta\bar{\sigma}$  или  $\Delta\sigma^*$ , та, которая больше.

3.17 Результаты измерений и расчеты записать в таблицу 1.

#### 4 Контрольные вопросы

4.1 Какое излучение называется тепловым?

4.2 Что такое энергетическая светимость, спектральная излучательная и поглощательная способности тел?

4.3 Какое тело называется абсолютно черным?

4.4 Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.

4.5 Сформулируйте законы Стефана-Больцмана и Вина.

4.6 В чем заключается гипотеза Планка?

## Лабораторная работа № 18

### Изучение фотоэффекта и определение характеристик вакуумного фотоэлемента

**Цель и задачи работы:** Изучение законов фотоэффекта, исследование зависимости силы фототока от напряжения и от светового потока, определение чувствительности фотоэлемента.

#### 1 Общие сведения

Фотоэффектом называется освобождение (частичное или полное) электронов от связей с атомами и молекулами вещества под действием электромагнитного излучения, в частности, света.

Фотоэффект – явление, открытие и исследование которого сыграли важную роль в развитии квантовой теории света.

Первые фундаментальные исследования внешнего фотоэффекта были выполнены русским ученым А.Г. Столетовым.

Экспериментально были установлены следующие законы:

1) Величина фототока насыщения прямо пропорциональна световому потоку, падающему на катод, т.е.:

$$I_{\phi} = K \cdot \Phi, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, называемой фоточувствительностью фотоэлемента, зависящий от спектрального состава светового потока;  $\Phi$  – световой поток, лм. Фоточувствительность фотоэлемента прежде всего зависит от материала катода.

2) Кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

3) Независимо от интенсивности падающего на катод света фотоэффект начинается только при определенной характерной для данного металла минимальной частоте света, называемой «красной границей» фотоэффекта.

Эйнштейн в 1905 году показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе квантовой теории света. Согласно теории Эйнштейна свет частотой  $\nu$  не только испускается, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами). Энергия квантов определяется формулой Планка:

$$E = h \cdot \nu, \quad (2)$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка;  $\nu$  - частота света, Гц.

Эйнштейном была выведена формула, объясняющая второй и третий законы фотоэффекта:

$$h \cdot \nu = A_{\phi} + \frac{m \cdot \nu^2}{2}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса электрона, кг;  $\nu$  - скорость электрона, м/с;  $A_{\phi}$  – работа выхода электрона, Дж.

Согласно (3) энергия кванта света расходуется на совершение работы  $A_{\phi}$  выхода электрона из металла и на сообщение электрону кинетической энергии.

#### 2 Описание установки и вывод расчетной формулы

Для выполнения данной лабораторной работы используется фотоэлемент, оптическая скамья с источником света и со шкалой, микроамперметр, вольтметр, выпрямитель.

Рассмотрим вакуумный фотоэлемент с внешним фотоэффектом. Он представляет собой стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещенная в центре баллона. При освещении катода в цепи возникает электрический ток (рисунок 1).

Большинство современных фотоэлементов имеют сурьмяно-цезиевые или кислородно-цезиевые катоды, обладающие высокой чувствительностью, являющейся основной характеристикой фотоэлемента.

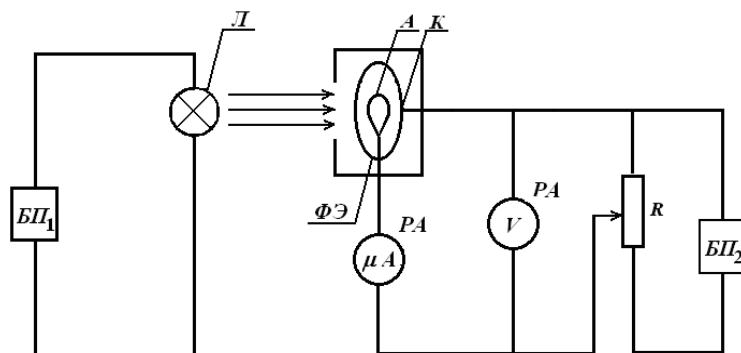


Рисунок 1 Электрическая схема установки: ФЭ - вакуумный фотоэлемент; БП<sub>1</sub> – блок питания лампы; БП<sub>2</sub> – блок питания фотоэлемента; Л – лампа; К – катод и А – анод фотоэлемента; РА – микроамперметр; PV – вольтметр; R – потенциометр

Интегральная чувствительность фотоэлемента  $K$  выражается величиной силы тока в микроамперах, возникающего в цепи фотоэлемента при падении на него светового потока в один люмен от стандартного источника излучения (вольфрамовая лампа со световым потоком  $\Phi = 300 \text{ лм}$ ):

$$K = \frac{I_{\phi}}{\Phi}. \quad (4)$$

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 529; /2/ С. 378-383; /3/ С. 37; /4/ С. 431-494.

**Задание 1** Получение вольтамперной характеристики  $I_{\phi} = f(U)$  при  $\Phi = \text{const}$

3.1 Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 1.

3.2 После проверки схемы преподавателем включить источник питания и установить с помощью потенциометра напряжение  $U=0$ .

3.3 Поместить фотоэлемент на расстоянии  $r_1=25 \text{ см}$  от лампы.

3.4 Записать показания микроамперметра, изменяя с помощью потенциометра напряжение от 0 до 100 В с интервалом в 5 В.

3.5 Поместить фотоэлемент на расстоянии  $r_2 = 15 \text{ см}$  от лампы и также, как в пункте 3.4, записать показания микроамперметра, изменяя напряжение с помощью потенциометра.

3.6 Данные занести в таблицу 1.

3.7 Построить две вольтамперные характеристики, выражающие зависимость  $I_{\phi} = f(U)$ , на одной координатной плоскости.



Таблица 1 Экспериментальные данные для построения  
вольтамперных характеристик

№ опытов	Обозначения физических величин					
	$r_1$ , м	$I_\Phi$ , мкА	$U$ , В	$r_2$ , м	$I_\Phi$ , мкА	$U$ , В
1						
2						
3						
4						
...						

## Задание 2 Получение световой характеристики $I_\Phi=f(\Phi)$

3.1 Установить с помощью потенциометра  $R$  напряжение  $U=100В$ .

3.2 Поместить фотоэлемент на расстоянии  $r = 15$  см от лампы и включить лампу, измерить величину фототока  $I_\Phi$  с помощью микроамперметра.

3.3 Удаляя фотоэлемент от источника света через каждые 5 см, измерить силу тока и записать значения  $I_\Phi$  и  $r$  в таблицу 2.

3.4 Результаты показать преподавателю, а потом отключить питание.

3.5 Рассчитать для всех расстояний  $r$  соответствующие значения светового потока, попавшего на катод фотоэлемента:

$$\Phi = \frac{\Phi_o \cdot S}{4\pi \cdot r^2}, \quad (5)$$

где  $\Phi_o$  – полный световой поток, лм;

$S$  – площадь входного отверстия в защитном кожухе фотоэлемента ( $S = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ).

Таблица 2 Экспериментальные и расчетные данные для построения световой  
характеристики  $I_\Phi=f(\Phi)$

№ опыта	Обозначения физических величин						
	$\Phi$ о, лм	$S$ , м <sup>2</sup>	$r$ , м	$r^2$ , м <sup>2</sup>	$I_\Phi$ , мкА	$\Phi$ , лм	$\bar{K}$ кА/лм
1							
2							
3							
4							
...							

3.6 Построить график световой характеристики  $I_\Phi=f(\Phi)$ .

3.7 Определить интегральную чувствительность фотоэлемента  $\bar{K}$ , как угловой коэффициент световой характеристики.

3.8 Расчет погрешности  $\Delta K$  произвести по инструментальным погрешностям  $\Delta I$ ,  $\Delta r$ ,  $\Delta \pi$ .

Максимальную относительную погрешность можно найти по формуле:

$$\varepsilon_K = \frac{\Delta K}{K} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2}, \quad (6)$$

где  $a$  – сторона квадратного входного отверстия защитного кожуха фотоэлемента

$\Delta r = \Delta a = 1\text{мм}$ ,  $\Delta \pi = 0,005$ ,  $\Delta I$  находится по классу точности микроамперметра  $\gamma$ :

$$\Delta I = \frac{\gamma \cdot I_{\max}}{100}.$$

3.9 Из формулы (6) найти абсолютную погрешность  $\Delta K$ :

$$\Delta K = \varepsilon_K \cdot \bar{K}.$$

3.10 Результат записать в виде  $K = \bar{K} \pm \Delta K$ .

#### 4 Контрольные вопросы

- 4.1 Какова физическая природа света?
- 4.2 Как действует свет на элементарные частицы, например, на свободный электрон, на орбитальный электрон в атоме?
- 4.3 Что называется внешним фотоэффектом, внутренним фотоэффектом?
- 4.4 Как сформулировать законы внешнего фотоэффекта?
- 4.5 О чем говорит уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
- 4.6 Как объясняются с точки зрения квантовой теории 1, 2, 3 законы фотоэффекта?
- 4.7 Что такое задерживающее напряжение и как оно определяется?
- 4.8 Каково устройство вакуумного фотоэлемента?
- 4.9 Что выражает вольтамперная и световая характеристики?
- 4.10 Что называется интегральной чувствительностью фотоэлемента и как она определяется?
- 4.11 Что собой представляет спектральная чувствительность фотоэлемента?
- 4.12 Каково назначение фотоэлемента, области его применения?

## Лабораторная работа № 19

### Изучение линейчатых спектров ртути, неона и водорода

**Цель и задачи работы:** Знакомство с основными положениями квантовой физики. Градуировка монохроматора по известным значениям длин волн спектральных линий ртути и нахождение значения длин волн линий в спектре водорода и неона.

#### 1 Общие сведения

В природе происходит постоянный обмен энергией между телами. Одним из способов такого обмена является излучение и поглощение электромагнитных волн. Спектральный состав излучения тела зависит от его температуры, химической природы и агрегатного состояния. Спектры излучения бывают сплошные, полосатые и линейчатые.

Сплошной спектр дают нагретые твердые тела и жидкости.

Атомы газов при высоких температурах дают линейчатый (атомный) спектр. Каждый химический элемент обладает характерным для него линейчатым спектром.

Спектр излучения, испускаемый возбужденными молекулами, состоит из большого числа линий, сливающихся в полосы. Такой спектр называется полосатым (молекулярным).

В основе теории линейчатых спектров лежат 2 постулата Бора:

1) Атом может находиться только в некоторых избранных (квантовых) состояниях, характеризующихся определенными прерывными (дискретными) значениями энергии  $E_1, E_2, E_3, \dots$ . Эти состояния называются стационарными. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает. Условие стационарности выражается формулой

$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $n$  – главное квантовое число (номер энергетического уровня, на котором находится электрон в атоме);  $m$  – масса электрона, кг;  $v$  – скорость электрона на  $n$ -й орбите, м/с;  $r$  – радиус электронной орбиты, м;  $h$  – постоянная Планка, Дж.с.

2) При переходе электрона из стационарного состояния с большей энергией  $E_{n_2}$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_{n_1}$ , энергия атома изменяется на величину  $\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1}$ . При этом испускается один фотон с энергией

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – частота электромагнитного излучения, Гц.

Такое же соотношение справедливо и для случая поглощения, когда за счет энергии поглощенного фотона электрон переходит с одного энергетического уровня на другой, более высокий уровень.

#### 2 Описание установки

Для выполнения данной лабораторной работы используются монохроматор УМ-2, неоновая, ртутная и водородная лампы.

Для градуировки спектрального прибора – монохроматора УМ-2, используется спектр атома ртути в видимой области.

Для исследования спектров излучения применяется универсальный монохроматор УМ-2, принципиальная схема которого представлена на рисунке 1.

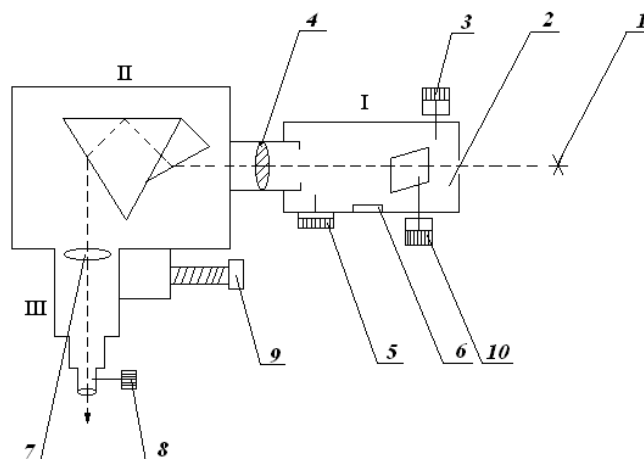


Рисунок 1 Принципиальная схема монохроматора: I – коллиматор; II – призма; III – зрительная труба; 1 – источник света; 2 – входная щель; 3 – винт; 4 – объектив; 5 – винт для установки объектива; 6 – шкала объектива; 7 – линза окуляра; 8 – окуляр; 9 – барабан с делениями; 10 – заслонка

Основные части монохроматора: коллиматор, дисперсионная призма и зрительная труба. Свет от источника 1 попадает на входную щель 2, ширина которой может регулироваться винтом 3.

Входная щель находится в фокусе объектива коллиматора 4. Вышедший из коллиматора пучок лучей будет параллельным и, пройдя дисперсионную призму, даст в поле зрения зрительной трубы картину спектра.

В фокусе камерного окуляра 7 имеется указатель (стрелка), относительно которого должна устанавливаться изучаемая линия спектра. Установка линии спектра производится путем поворота дисперсионной призмы барабаном 9.

На барабане нанесены деления, оцифрованные через каждые  $50^\circ$ . Цена каждого деления равна  $2^\circ$ . Установка объектива коллиматора в правильное положение относительно щели производится винтом 5. Это положение можно отметить по шкале 6. Если в поле зрения зрительной трубы монохроматора одинаково резко видны указатель и края входной щели коллиматора, то установка монохроматора правильная.

Фокусировка (наведение на резкость изображения) монохроматора производится сначала для указателя (стрелки) простым поворотом втулки окуляра 8, а затем для щели коллиматора винтом 5. Заслонка 10 служит для перекрывания светового луча. В рабочем положении заслонка должна быть открыта.

### 3 Порядок выполнения работы и требования к оформлению результатов

При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить и законспектировать следующие библиографические источники: /1/ С. 435, 506-517; /2/ С. 349, 392-395; /3/ С. 61-66.

#### Задание 1 Градуировка монохроматора

Чтобы использовать монохроматор для определения длины волны линий в исследуемом спектре, необходимо произвести градуировку, т.е. установить зависимость между показаниями барабана и длиной волны спектральных линий, находящихся против стрелки, наблюдаемой в окуляре. В данной лабораторной работе градуировка УМ-2 производится по известным спектральным линиям атомов ртути (таблица 1).

3.1 Перед щелью монохроматора устанавливают источник света – ртутную лампу в

защитном корпусе. Питание лампы производится от электрической сети с напряжением 220 В.

Следует иметь в виду, что ртутная лампа излучает наряду с видимым спектром мощный поток ультрафиолетовых лучей, вредных для глаз, поэтому смотреть на ртутную лампу незащищенными глазами не следует.

Таблица 1 Градуировочная таблица по спектру ртути

Обозначение физических величин			
	Характеристика спектральной линии	Длина волны $\lambda$ , нм	Показания барабана монохроматора $n$ , дел.
	красная	690,7	
	1-я красно-оранжевая	612,4	
	2-я красно-оранжевая	607,3	
	желтая - левая	579,1	
	желтая - правая	576,9	
	желто - зеленая	546,1	
	голубовато – зеленая	492	
	1-я синяя	435,8	
	2-я синяя	434,8	
0	3-я синяя	433,9	
1	1-я фиолетовая	407,7	
2	2-я фиолетовая	404,6	

3.2 Произвести фокусировку (монохроматора по описанию в разделе 2). Добиться резкого изображения спектральных линий и стрелки в поле зрения. Если линии широкие, то ширину щели надо уменьшить, чтобы они не перекрывали друг друга (проверить на двух близких желтых линиях - в таблице 1 №4 и №5).

3.3 Просмотреть весь спектр, поворачивая барабан от его левого края, где видны красные линии, до правого края, где видны фиолетовые линии.

3.4 Произвести измерения по барабану, устанавливая стрелку на каждую линию спектра, указанную в таблице 1. Все отсчеты  $n$  занести в эту же таблицу.

3.5 По данным таблицы 1 построить график зависимости (использовать миллиметровую бумагу). По оси  $X$  отложить показания барабана, по оси  $Y$  – длины волн. По оси  $Y$  шкалу длин волн следует начать с 400 нм и закончить 700 нм, а по оси  $X$  от 0 до 3000°. Размер графика должен быть не меньше целой страницы тетрадного листа. По точкам провести плавную линию (без изломов).

## Задание 2 Определение длин волн спектральных линий водорода

3.1 Перед щелью монохроматора устанавливается водородная лампа, подключенная к блоку питания. Источником излучения служит разряженный газ водород, находящийся в запаянной трубке. В трубку впаяны два электрода, на которые подается высокое напряжение от генератора. В газе возникает электрический разряд, вызывающий свечение газа.

3.2 Проверить фокусировку прибора по спектру водорода – в поле зрения должны быть видны отдельные яркие линии.

3.3 Снять отсчеты по барабану, соответствующие синей, зелено-голубой и красной линиям спектра водорода. Все показания занести в таблицу 2.

Таблица 2 Определение длин волн в спектре водорода

Обозначение физических величин			
№ опыта	Характерные линии в спектре водорода	Показания барабана $n$ , дел.	$\lambda$ , нм (по графику)
1	синяя		
2	зелено-голубая		
3	красная		

3.4 Пользуясь градуировочным графиком монохроматора, определить значения длин волн, соответствующих полученным отсчетам на барабане и записать в таблицу 2.

### Задание 3 Определение длин волн спектральных линий неона

3.1 Перед щелью монохроматора установить неоновую лампу, питаемую от сети 220 В. В поле зрения должны наблюдаться отдельные яркие линии неона (в основном – красные, оранжевые, яркая желтая, очень слабые зеленые линии).

3.2 Совмещая стрелку в поле зрения окуляра с линиями, указанными в таблице 3, произвести отсчеты по барабану  $n$  монохроматора и записать данные в эту таблицу.

3.3 Используя градуировочный график, найти длину волн для всех указанных в таблице 3 линий неона.

Таблица 3 Определение длин волн в спектре неона

Обозначение физических величин			
	Характерные линии в спектре неона	Показания барабана $n$ , дел.	Длины волн $\lambda$ , нм (по графику)
	красная		
	оранжевая		
	желтая		
	зеленая		
	1-я светло-зеленая		
	2-я светло-зеленая		
	3-я светло-зеленая		
	сине-зеленая		

3.4 Сделать оценку погрешностей  $\Delta\lambda$  по градуировочному графику ( $\Delta\lambda \sim \Delta n$ ).  $\Delta n$  – инструментальная погрешность монохроматора равна половине цены наименьшего деления барабана монохроматора, т.е.  $1^\circ$  (рисунок 2).

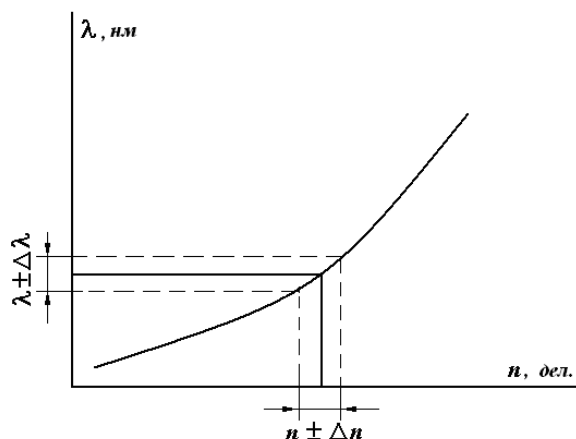


Рисунок 2 Градуировочный график

3.5 Результат представить в виде  $\lambda \pm \Delta\lambda$ .

#### 4 Контрольные вопросы

- 4.1 Что представляют собой линейчатые спектры? При каких условиях они получаются?
- 4.2 Как формулируются постулаты Бора?
- 4.3 Как записывается формула Бальмера-Ридберга? Какой физический смысл имеют входящие в нее величины?
- 4.4 Как выглядит энергетическая диаграмма атома водорода и процессы поглощения и испускания квантов электромагнитного излучения?
- 4.5 Как образуются спектральные серии? В каком случае длины волн излучения больше? В каком случае энергия фотона больше?
- 4.6 К какой серии относятся линии, наблюдаемые в данной лабораторной установке?
- 4.7 Каково назначение основных узлов монохроматора?
- 4.8 Как определяется длина волны спектральных линий в спектре излучения неона с помощью монохроматора?
- 4.9 Для чего нужно градуировать монохроматор?
- 4.10 Что называется дисперсией света и где происходит дисперсия света в данной лабораторной установке?

#### Библиографический список

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Электронный ресурс]: учебное пособие / Т.И. Трофимова.-21-е изд., стер. - Москва: Академия, 2015. -560 с. – Режим доступа: <http://biblio.bsau.ru/metodic/48977.pdf>
2. Зисман, Г. А. Курс общей физики [Текст]: учебное пособие / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. –Т.1 : Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны- 7-е изд., стер. - СПб.; М. ; Краснодар : Лань, 2007. - 339 с.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики [Текст]: учебное пособие / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. –Т.2 : Электричество и магнетизм.- 7-е изд., стер. - СПб.; М. ; Краснодар : Лань, 2007. - 339 с.
4. Грабовский Р. И. Курс физики [Текст]: учебное пособие для студ. вузов, обуч. по естественнонаучным, техн. и с.-х. направлениям и спец. / Р. И. Грабовский. – Изд. 10-е стер.- СПб. М.; Краснодар : Лань, 2007. - 607 с.

