

<b><u>МЕХАНИКА.....</u></b>	<b><u>2</u></b>
<u>Оценка погрешностей измерений.....</u>	<u>3</u>
<u>Изучение динамики вращательного движения.....</u>	<u>12</u>
<b><u>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....</u></b>	<b><u>18</u></b>
<u>Определение отношения теплоемкостей <math>C_p/C_v</math> методом Клемана и Дезорма.....</u>	<u>19</u>
<u>Изучение работы холодильника.....</u>	<u>25</u>
<b><u>ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.....</u></b>	<b><u>30</u></b>
<u>Электроизмерительные приборы.....</u>	<u>31</u>
<u>Изучение электростатического поля.....</u>	<u>40</u>
<u>Измерение коэффициента самоиндукции катушек.....</u>	<u>47</u>
<u>Измерение емкости конденсатора.....</u>	<u>50</u>
<u>Проверка полного закона Ома для переменного тока.....</u>	<u>56</u>
<u>Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.....</u>	<u>59</u>
<b><u>ОПТИКА.....</u></b>	<b><u>63</u></b>
<u>Определение показателя преломления стекла. Наблюдение явления полного внутреннего отражения .....</u>	<u>64</u>
<u>Изучение поляризации света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков .....</u>	<u>71</u>
<u>Изучение дифракции света на узкой щели и дифракционной решетке .....</u>	<u>77</u>

# **МЕХАНИКА**

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** Знакомство с анализом источников погрешностей при исследованиях, оценка систематических и случайных погрешностей.

**Оборудование, средства измерения:** электроизмерительный прибор по выбору преподавателя, секундомер.

### Введение

Основой естественных наук является эксперимент. Измерения – главная часть эксперимента. Они требуют от экспериментатора огромного старания и тщательности, знания методов измерений, умения обеспечить четкую и надежную работу аппаратуры. Не меньшего старания и навыков работы требуют вычисления, причем вычисления не только значений измеряемых величин, но и погрешностей их измерения.

Как же выглядит правильный научный эксперимент?

Во-первых, и это главное, в эксперименте не должно быть ошибок. Во-вторых, результаты эксперимента должны трактоваться однозначно. В-третьих, эксперимент должен быть повторяем другими экспериментаторами.

Характеристики процессов или свойств тел, которые могут быть определены количественно с помощью тех или иных измерений, называются *физическими величинами*.

Измерить какую либо физическую величину – это значит: сравнить ее с однородной *величиной, принятой за единицу измерения*.

Классификация измерений по видам связана с характером вычислительных операций, при помощи которых получают численное значение измеряемой величины.

**Прямыми** называют измерения, заключающиеся в отсчете показаний прибора, либо в сравнении измеряемой величины с мерой (измерения длины линейкой, температуры – термометром, силы тока – амперметром).

**Косвенными** называют измерения, результат которых определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью (формулой).

## 1. Экспериментальные погрешности

Никакие измерения нельзя произвести с абсолютной точностью. Еще в стародавние времена люди понимали важность указания погрешностей. Например, на вопрос пассажира ямщик отвечал, что до соседней станции семь верст с гаком. Очевидно, гак и есть величина погрешности измерения расстояния между станциями.

Погрешности возникают вследствие ограниченной точности измерительных приборов, неполноты наших знаний, трудности устранения второстепенных явлений. Поэтому в ходе измерений мы получаем не точное значение измеряемых величин, а значения, содержащие ту или иную, неизвестную нам погрешность. Основываясь на теории ошибок, обычно оказывается возможным установить предельное значение ошибки, т.е. определить интервал, в котором вероятнее всего находится истинное значение измеряемой величины.

Экспериментальные погрешности можно разделить на три типа: грубые промахи, систематические погрешности и случайные погрешности.

**Грубые погрешности** (просчеты) вызываются неверными отсчетами или неправильными записями показаний приборов, просчетами при вычислениях, являются следствием усталости экспериментатора. Просчеты обнаруживаются путем самоконтроля и повторных наблюдений. Если появились сомнения, следует снова и снова повторять измерения.

**Систематические погрешности** могут быть обусловлены методом измерений, когда систематически допускается одна и та же ошибка, несовершенством измерительных приборов, также они могут быть вызваны влиянием внешних условий измерений и условий среды (разница температур при взвешивании, магнитные поля при электрических измерениях и т. п.).

Систематические погрешности могут вносить и приборы сами по себе. При измерении температуры воды в калориметре к теплоемкости воды массы  $m$  добавляется теплоемкость термометра; при включении амперметра в электрическую цепь его внутреннее сопротивление изменяет величину силы тока, протекающего через эту цепь.

Систематические погрешности либо завышают, либо занижают значение измеряемой величины. Их нельзя уменьшить путем увеличения числа наблюдений.

Систематическая погрешность, вносимая в измерения прибором, зависит от его качества. Если на приборе не приводятся никаких сведений о его точности, то абсолютную погрешность прибора обычно принимают равной половине цены наименьшего деления шкалы прибора. Например, абсолютная погрешность измерения длины миллиметровой линейкой часто принимается равной  $\pm 0,5$  мм.

Абсолютная погрешность большинства электроизмерительных приборов оцениваются по классу точности. Условным обозначением класса точности является цифра, обведенная кружком (либо цифра, стоящая в ряду аббревиатуры прибора). Класс точности ( $\gamma$ ) определяет абсолютную приборную погрешность в процентах от наибольшего значения величины, которое может быть измерено данным прибором:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta x}{x} 100\%, \quad (1)$$

здесь  $\Delta x$  – абсолютная погрешность;  $x$  – предел шкалы прибора.

Например, амперметр имеет шкалу от 0 до 5 А, и его класс точности равен 1,0. Абсолютная погрешность силы тока составляет 1% от 5 А, т.е.  $\Delta I_{\text{приб}} = \pm 0,05$  А.

Для более верного измерения значения какой-либо физической величины нужно выбирать прибор такой чувствительности, чтобы можно было вести измерения, по крайней мере, на последней четверти его шкалы.

**Случайные погрешности** обуславливаются большим числом различных причин, например, неточностью отсчетов по шкале прибора; ограниченными возможностями органов чувств экспериментатора, а также его реакцией, навыками работы с приборами; беспорядочными изменениями внешних условий (температуры, давления, силовых полей и т. п.), которые невозможно контролировать.

Случайные ошибки невозможно ни исключить, ни заранее точно предвидеть и учесть. Нужно стремиться свести к минимуму их величину путем совершенствования математической обработки полученных результатов.

## **2. Вычисление случайной погрешности прямых измерений**

Для нахождения **случайной погрешности** измерений замер необходимо произвести несколько раз. Результаты таких измерений,

проведенных тщательно, имеют близкие значения погрешностей и называются *равноточными*.

В качестве действительного значения физической величины принимают среднее арифметическое значение измеряемой величины

$$x_{\text{cp}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (2)$$

где  $n$  – число измерений.

Для оценки случайной погрешности с небольшим числом измерений, например 10, применяют метод Стьюдента. Метод приводим без теоретических выкладок, их Вы можете найти в учебниках по математической статистике.

Вычисляют погрешность среднего арифметического  $\tilde{S}$  по формуле:

$$\tilde{S} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{\text{cp}})^2}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

и задают значение коэффициента надежности  $\alpha = 0,90 - 0,95$ . **Надежность** – это вероятность того, что истинное значение величины содержится в интервале шириной  $2\Delta x$  около  $x_{\text{cp}}$ . Надежность – очень важный параметр. Чаще всего он и является основным фактором, определяющим выбор метода измерений, приборов и математических методов расчета.

Из табл. 1 определяют коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha N}$  для заданной надежности и числа произведенных измерений  $N$ . Границы доверительного интервала  $\Delta x$  (**абсолютная погрешность измерений**<sup>1</sup>):

$$\Delta x = t \tilde{S}. \quad (4)$$

Результат измерений с указанием надежности записывается в виде:

$$x = x_{\text{cp}} \pm \Delta x_{\text{cp}}. \quad (5)$$

---

<sup>1</sup> Абсолютная погрешность при однократном прямом измерении равна погрешности прибора.

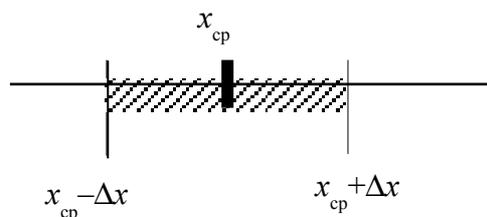


Рис. 1. Интервал достоверных значений

Такая запись означает, что истинное значение измеряемой величины содержится с данной надежностью (с какой-то вероятностью: 90%, 95% и т.д.) в интервале от  $x_{cp} - \Delta x_{cp}$  до  $x_{cp} + \Delta x_{cp}$  (рис.1).

Таблица 1. Коэффициенты Стьюдента  $t$

Число измерений $N$	Надежность, $\alpha$				
	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7
3	1,9	2,9	4,3	7,1	9,9
4	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6
6	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7
8	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3
15	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0
20	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9
25	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8

Абсолютная погрешность не в полной мере характеризует измерение. Пусть, например, в результате измерений установлено, что длина стола равна  $l = (100 \pm 1)$  см, а толщина его крышки  $d = (2 \pm 1)$  см. Хотя абсолютная погрешность измерения в этих двух случаях одинакова, понятно, что в первом случае качество измерения выше. Для характеристики точности измерения вводится относительная погрешность. Относительной погрешностью измерения называется отношение абсолютной погрешности  $\Delta x$  к значению  $x$  измеряемой величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (6)$$

### 3. Общая схема обработки данных измерений, полученных в учебном практикуме

Положим, надо найти значение некоторой величины  $y$  по данным непосредственно измеренных величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Для этого необходимо:

- 1) Произвести необходимое число раз непосредственной измерение всех величин, входящих в равенство, для расчета величины  $y$ .
- 2) Произвести обработку результатов измерений:
  - a) просмотреть ряды измерений; явно сомнительные результаты отбросить. В случае необходимости измерение повторит;
  - b) вычислить средние арифметические значения каждой из измеренных величин с округлением<sup>2</sup>;
  - c) вычислить абсолютные погрешности отдельных измерений с той же точностью, что средние значения;
  - d) если в формулу входят табличные константы ( $\pi$ ,  $g$  и т. п.), выбрать их значения с той же точностью.
- 3) Рассчитать абсолютную погрешность  $\Delta y$  по формуле (7), вычислить относительную погрешность результата.
- 4) Если произведено несколько серий измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  в постоянных условиях, то вычислить  $y_i$  по значениям непосредственно измеренных величин для каждой серии. Найти среднее значение  $y_{cp}$  и подсчитать величины абсолютных ошибок  $\Delta y_i$ . Найти среднюю абсолютную ошибку  $\Delta y$  как среднее арифметическое из ошибок  $\Delta y_i$ .
- 5) Записать окончательный результат в виде:

$$y = y_{cp} \pm \Delta y; \quad \varepsilon = \pm \frac{\Delta y}{y} 100\%.$$

### 4. Некоторые правила приближенных вычислений.

Прежде всего, бессмысленно вести вычисления с точностью большей, чем позволяют исходные данные измерений. Очевидно, что математические операции сами по себе не могут сделать дан-

---

<sup>2</sup> Число значащих цифр определяется шкалой прибора.

ные измерений более точными, чем позволяют их сделать измерительные приборы.

При определении численного значения величины ошибки следует различать два случая:

1. Приближенные величины, значения которых могут быть вычислены с любой наперед заданной точностью (например:  $\pi$ ,  $e$ , логарифмы и т.п.), или величины, для которых «точные» (табличные) значения установлены соответствующими соглашениями (значения некоторых физических величин, физические константы). В этом случае за истинное значение величины принимается ее табличное значение, взятое с такой же точностью, которая соответствует точности Ваших измерений.
2. Результаты измерений, ошибки которых нам никогда заранее неизвестны. В этом случае абсолютная погрешность числа не должна превышать единицу цифры последнего разряда в числе, т.е. в приближенном числе все цифры должны быть верными, за исключением последней цифры или знака.

Значащие цифры – цифры, начиная с первой слева, отличной от нуля, и кончая последней, за точность которой еще можно поручиться. Если же нули стоят в десятичной дроби с левой стороны и служат для того, чтобы указать разряды других цифр, то эти нули значащими цифрами не считаются. Например, в числе 0,00209 нули слева от двойки незначащие, нуль между двойкой и девяткой значащий, все число имеет три значащих цифры. Для того чтобы выделить в результате измерения среди значащих цифр верные, т.е. такие, точное значение которых обеспечено точностью нашего измерения, надо правильно записывать приближенные числа.

В случае приближенных чисел запись, например 2,39, означает, что верны все знаки до второго за запятой, а запись 2,3900 означает, что верны также третий и четвертый знаки. В физике обычно принято записывать число в виде «степеней десяти», т.е. с помощью показателей степени, например, вместо 36900 пишут  $3,69 \cdot 10^4$ , а вместо 0,0021 записывают  $2,1 \cdot 10^{-3}$ . Одно из преимуществ такой записи состоит в том, что она позволяет четко и ясно указать число значащих цифр. Например, запись  $1,673 \cdot 10^{-24}$  означает, что верны только четыре первых знака (1,673). Если измеренное расстояние 25,4 км необходимо записать в системе СИ, то правильная запись будет  $2,54 \cdot 10^4$  м.

Следует помнить, что при округлении оставляют только верные знаки, остальные отбрасывают.

В разности и сумме сохраняется столько десятичных знаков, сколько их содержится в том из данных, где десятичных знаков меньше

$$2,30 + 0,223 - 1,201 = 1,32.$$

В произведении и частном сохраняют столько значащих цифр, сколько их имеется в том из данных, где значащих цифр меньше.

$$2,324 \cdot 3,9 = 8,97 \approx 9,0.$$

При возведении в степень сохраняют столько значащих цифр, сколько имеет возводимое в степень число:

$$(2,35)^2 = 5,5225 \approx 5,52.$$

При извлечении корня результат вычисляется до столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное число:

$$\sqrt{4,22} \approx 2,102 \approx 2,10.$$

При пользовании таблицами логарифмов выбирают значение логарифма до числа знаков, равного верному числу знаков в логарифмируемом числе:

$$\lg 27,30 = 1,436.$$

Следует заметить, что если соответствующая операция является промежуточной, то в ее результате следует брать на одну значащую цифру больше, чем указано в правилах, а в окончательном результате последнюю цифру отбрасывать с соблюдением правил округления.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задание 1.** Оцените по классу точности электроизмерительного прибора абсолютную погрешность измеряемой величины. Для этого воспользуйтесь формулой (1). Приборы выдаются по указанию преподавателя. Данные занесите в табл. 2.

Таблица 2.

Прибор	Класс точности	Предел шкалы	Абсолютная погрешность	Цена деления

**Задание 2.** Оцените случайную погрешность прямых равноточных измерений. Для этого необходимо:

1. Заготовьте табл. 3.
2. Измерьте секундомером промежутки времени, например, 2 с. Измерения провести  $n=25$  раз. Результаты измерений занесите в табл.
3. Определите абсолютные и относительные погрешности для  $n=5$  и  $n=25$  измерений по схеме, изложенной в разделе 2.
4. Запишите окончательные результаты измерений времени для  $n=5$  и  $n=25$ .
5. Сравните полученные результаты.
6. Сделайте вывод.

Таблица 3.

№	$t_i, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$\Delta t_i, \text{с}$	$(\Delta t_i)^2$	$\tilde{S}$	$\Delta t, \text{с}$	$\varepsilon, \%$
1							
2							
...							
5							
1.							
2.							
...							
2							
5.							

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему нельзя ни одно измерение произвести абсолютно точно и получить истинное значение величины?
2. Какие виды погрешностей существуют, дайте определения, назовите источник погрешностей.
3. Как подсчитать абсолютную и относительную погрешность результатов измерений?
4. В чем смысл введения абсолютной погрешности измерений?
5. Что такое доверительный интервал?
6. Что такое надежность измерения?
7. Как записывается окончательный результат измерений, и что означает такая запись?

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

**Цель работы:** Экспериментальная проверка основного закона вращательного движения.

**Оборудование, средства измерения:** маятник Обербека, набор грузов, секундомер, линейка.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

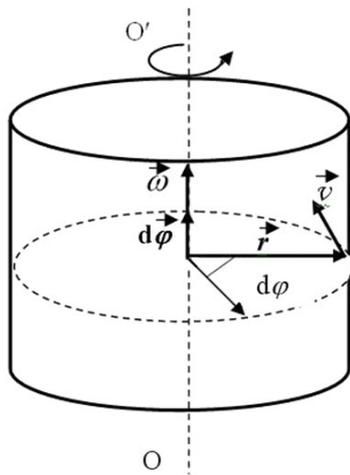


Рис. 1. Вращение твердого тела.

**Вращательным движением твердого тела** называется такое движение, при котором траектории всех точек твердого тела представляют собой концентрические окружности с центрами на одной прямой, называемой осью вращения (рис. 1). При этом положение тела в любой момент времени определяется углом поворота  $\varphi$ . Вращение твердого тела характеризуется **угловой скоростью  $\vec{\omega}$**

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \quad (1)$$

и **угловым ускорением  $\vec{\varepsilon}$**

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (2)$$

Вектор  $\vec{\omega}$  направлен вдоль оси вращения, так же как и вектор  $d\vec{\varphi}$ , направление их определяется по правилу правого винта. Вектор  $\vec{\varepsilon}$  направлен вдоль оси вращения в сторону вектора приращения угловой скорости. Линейная скорость точки  $\vec{v}$  связана с угловой скоростью и радиусом траектории соотношением

$$\vec{v} = [\vec{\omega}; \vec{r}]. \quad (3)$$

Связь линейного ускорения точки с угловым:

$$a = \frac{dv}{dt} = \beta r. \quad (4)$$

При равномерном вращении

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{T} = \text{const}, \quad (5)$$

где  $T$  – период вращения.

Вращательное движение составляет, в частности, основу движений элементов опорно-двигательного аппарата человека и животных.

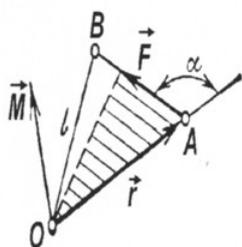


Рис. 2. К определению момента силы

Вращательное движение твердого тела совершается под действием сил, лежащих в плоскостях, перпендикулярных к оси вращения, и не проходящих через ось вращения. Мерой взаимодействия тел при вращательном движении является не сила, как при поступательном движении, а момент силы  $\vec{M}$ .

**Моментом силы  $\vec{F}$**  относительно неподвижной точки  $O$  называется физическая величина, определяемая векторным произведением радиус-вектора  $\vec{r}$ , проведенного из точки  $O$  в точку  $A$  приложения силы  $\vec{F}$  (рис. 2):

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]. \quad (6)$$

Модуль момента силы

$$M = Fr \sin \alpha = F \cdot x, \quad (7)$$

где  $x$  – плечо силы – кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой  $O$ ;  $\alpha$  – угол между  $\vec{r}$  и  $\vec{F}$ .

Инертность тел при вращении учитывается с помощью величины, называемой моментом инерции –  $J$ , а при поступательном движении – массой  $m$ . **Момент инерции материальной точки** равен произведению массы  $m$  на квадрат расстояния до оси вращения  $r$

$$I = mr^2. \quad (8)$$

**Момент инерции системы** материальных точек относительно оси вращения

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (9)$$

где  $m_i$  – масса  $i$  - точки до оси вращения;  $r_i$  – расстояние  $i$  -точки до оси вращения.

В случае непрерывного распределения масс (твердого тела) производится интегрирование по всей массе или объему твердого тела

$$I = \int_M r^2 dm = \int_V r^2 \rho dV . \quad (10)$$

Момент инерции тела зависит от того, относительно какой оси оно вращается и как распределена масса тела по объему.

Если ось вращения не проходит через центр масс тела, то используют теорему Штейнера:

$$I_Z = I_C + md^2 \quad (11)$$

где  $I_C$  – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной оси вращения;  $m$  – масса тела;  $d$  – расстояние между осями.

Опыт показывает, что при вращательном движении

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon} . \quad (12)$$

– это **основное уравнение динамики вращательного движения** (2 закон Ньютона для вращательного движения).

Внимание! Математическая форма записи основных закономерностей для поступательного и вращательного движений остается неизменной.

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	$m$	Момент инерции	$I$
Перемещение	$d\vec{r}$	Угловое перемещение	$d\vec{\varphi}$
Скорость	$\vec{v}$	Угловая скорость	$\vec{\omega}$
Ускорение	$\vec{a}$	Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon}$
Сила	$\vec{F}$	Момент силы	$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]$
Основное уравнение динамики	$\vec{F} = m\vec{a}$	Основное уравнение динамики	$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}$

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

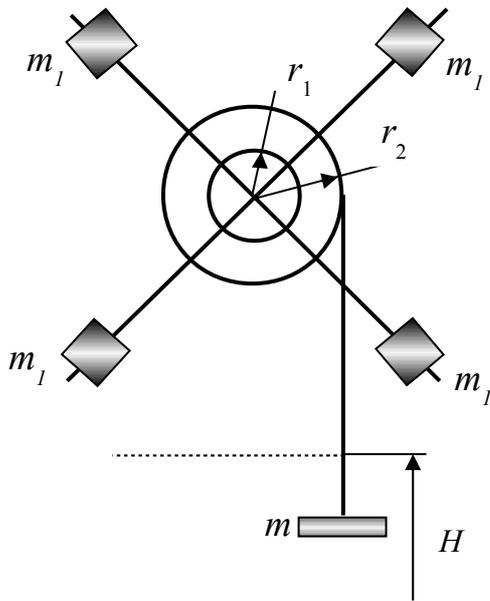


Рис. 3. Маятник Обербека

Работа выполняется с помощью маятника Обербека (рис. 3). Вращающаяся часть установки состоит из четырех спиц, укрепленных на втулке под прямым углом друг к другу. На ось втулки насажены два легких шкива различных радиусов  $r_1 = 9,3$  мм и  $r_2 = 17,5$  мм. Вращение происходит вокруг горизонтальной оси. Момент инерции системы относительно оси вращения можно изменить, либо изменяя массы грузиков, укрепленных на спицах, либо перемещая грузы

вдоль спиц.

Каждый раз, закрепляя грузики на спицах на определенном расстоянии от оси вращения, необходимо **проверить, правильно ли сбалансирована система**, т. е. находится ли она в безразличном равновесии.

Момент силы, вызывающий вращение маятника, создается натяжением нити, навитой на один из шкивов установки, к которой привязан груз  $m$ . Момент силы можно изменять, подвешивая к нити грузы различной массы или изменяя плечо силы, для чего нить закрепляется на шкивах разного диаметра.

В начальный момент ( $t = 0$ ) груз  $m$  покоится. Под действием груза нить разматывается, а груз  $m$  движется ускоренно и приводит во вращение крестовину маятника. Измеряя время  $t$ , в течение которого груз  $m$  из состояния покоя опустится на расстояние  $h$ , можно определить линейное ускорение:

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (13)$$

Зная радиус шкива можно найти угловое ускорение:

$$\varepsilon = \frac{a}{r}. \quad (14)$$

Если через  $T$  обозначить силу натяжения нити, то во время равноускоренного падения груза ее величина будет равна:

$$T = m(g-a). \quad (15)$$

Следовательно, вращающий момент относительно оси вращения установки будет:

$$M = T r = m(g-a)r. \quad (16)$$

Моментом сил трения пренебрегаем.

**Задача.** Вам необходимо экспериментально установить характер зависимости углового ускорения  $\varepsilon$  вращения маятника от момента силы  $M(M_1, M_2, M_3)$ . Ожидаемые результаты представлены на рис.4.

### ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТА

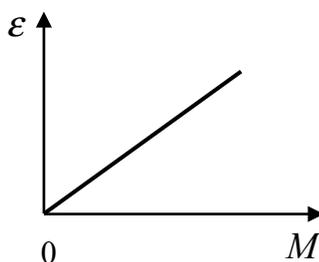


Рис. 4. Теоретическая зависимость  $\varepsilon(M)$

1. Установите грузы на спицах на одинаковых расстояниях от оси вращения. Положите на платформу гирю массы  $m_1$ . Измерьте время движения груза  $t$  и расстояние  $h$ , пройденное грузом
2. Повторите опыт для грузов с массой  $m_2$  и  $m_3$ , расстояние, пройденное грузом, оставьте прежним.
3. Рассчитайте значения ускорений  $a$  движения грузов по формуле (13).
4. Определите величины углового ускорения  $\varepsilon$  по формуле (14) и силы натяжения нити  $T$  по формуле (15).
5. Вычислите по формуле (16) значения вращающего момента  $M_1, M_2, M_3$ .
6. Результаты занесите в таблицу и затем представьте в виде графика  $\varepsilon = f(M)$ .
7. Пользуясь этим графиком, определите момент инерции системы ( $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{I} \Rightarrow I = \operatorname{ctg} \alpha$ ).

Таблица

положение грузов	$h$ , м	$m$ , кг	$t$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$T$ , Н	$M$ , Н·м	$\epsilon$ , с <sup>-2</sup>	$I$ , кг·м <sup>2</sup>
		$m_1$						
		$m_2$						
		$m_3$						

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких единицах измеряется угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение, вращательный момент и момент инерции тела?
2. Дайте определение физических величин, необходимых для описания вращательного движения тел (углового перемещения, угловой скорости, углового ускорения, вращательного момента, момента инерции тела, момента импульса).
3. Какова роль момента инерции во вращательном движении?
4. Что называется моментом силы относительно неподвижной точки? относительно неподвижной оси? Как определяется направление момента силы?
5. Что общего, и каково различие в понятиях «масса» и «момент инерции»?
6. Как можно определить момент инерции тела относительно произвольной оси, если известен момент инерции его относительно оси симметрии, параллельной произвольной оси?
7. Сформулируйте второй закон Ньютона для поступательного и вращательного движений.
8. Сопоставьте основные уравнения динамики поступательного и вращательного движений, прокомментировав их аналогию.

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ  
ФИЗИКА И  
ТЕРМОДИНАМИКА**

## Лабораторная работа № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ $C_p/C_v$ МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

**Цель работы:** Опытным путем определить отношение теплоемкостей воздуха и сравнить с расчетным значением. Закрепить понимание основных законов термодинамики.

**Принадлежности:** Сосуд большой с притертой пробкой и краном; жидкий манометр; насос

#### Теоретическая часть

При решении конкретных задач термодинамики пользуются понятиями теплоемкости, удельной Суд или молярной  $C$ .

Удельной теплоемкостью называют величину, численно равную количеству теплоты, необходимому для повышения температуры единицы массы вещества на 1 градус.

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}, \quad (1)$$

$m$  – масса вещества.

Молярной теплотой называется величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для повышения температуры одного моля вещества на 1 градус.

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT} \quad (2)$$

где  $\nu = m/M$  – число молей,  $M$  – молярная масса вещества. Заметим, что молярная теплоемкость в  $M$  раз больше удельной.

$$C = M \cdot c. \quad (3)$$

Поскольку количество теплоты  $\delta Q$ , необходимое для изменения температуры системы на  $dT$  градусов, зависит от характера происходящего при этом процесса, то теплоемкость системы также зависит от условий, при которых определяется отношение  $\frac{\delta Q}{dT}$ . Это означает, что теплоемкость является не функцией состояния системы, а функцией процесса: одна и та же система в зависимости от происходящего в ней процесса обладает различными теплоемкостями. Наибольшее практическое значение имеют теплоемкости при постоянном объеме ( $c_v$  и  $C_v$ ) и при постоянном давлении ( $c_p$  и  $C_p$ ).

Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении

$$C_p = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_p .$$

Так как при постоянном объеме  $dV = 0 \Rightarrow \delta Q = dU$ , то молярная теплоемкость газа

$$C_V = \frac{1}{\nu} \frac{dU}{dT} .$$

Удельные теплоемкости

$$c_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_p ; c_V = \frac{1}{m} \frac{dU}{dT} \quad (4)$$

Индексы в скобках указывают на величину, оставшуюся неизменной в данном процессе.

Вид функциональной зависимости теплоемкостей в каждом конкретном процессе легко устанавливается с помощью первого начала термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (5)$$

где  $\delta Q$  - элементарное количество теплоты, подводимое к системе;  $dU$  - изменение внутренней энергии системы;  $\delta A$  - элементарная работа, производимая при этом системой. Причем

$$dU = \nu \frac{i}{2} R dT \quad (6)$$

$$\delta A = p dV \quad (7)$$

где  $i$  - число степеней свободы молекул данного вещества;  
 $\nu = m/M$  - число молей ;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  
 $dT$  - изменение температуры;  $P$  - давление;  
 $dV$  - изменение объема.

а) **Изохорический процесс** ( $V = const$ )

$$C_V = \frac{i}{2} R \quad (8)$$

б) **Изобарический процесс** ( $P = const$ )

$$C_p = \frac{i+2}{2} R \quad (9)$$

в) **Адиабатический процесс** ( $\delta Q = 0$ )

$$PV^\gamma = const , \quad (10)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} \quad (11)$$

г) **Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ )

$$C_T \rightarrow \infty \quad (12)$$

Таким образом, для нахождения теплоемкостей любого газа, состояние которого близко к состоянию идеального, достаточно знать число степеней свободы его молекул.

Для теплоемкости газа, состояние которого меняется адиабатически ( $\delta Q = 0$ ), получается нулевое значение (см. формулы 1 и 2).

Практически адиабатические процессы могут быть осуществлены либо при очень хорошей теплоизоляции системы, либо при большой скорости процесса, когда теплообмен с окружающей средой не успевает произойти.

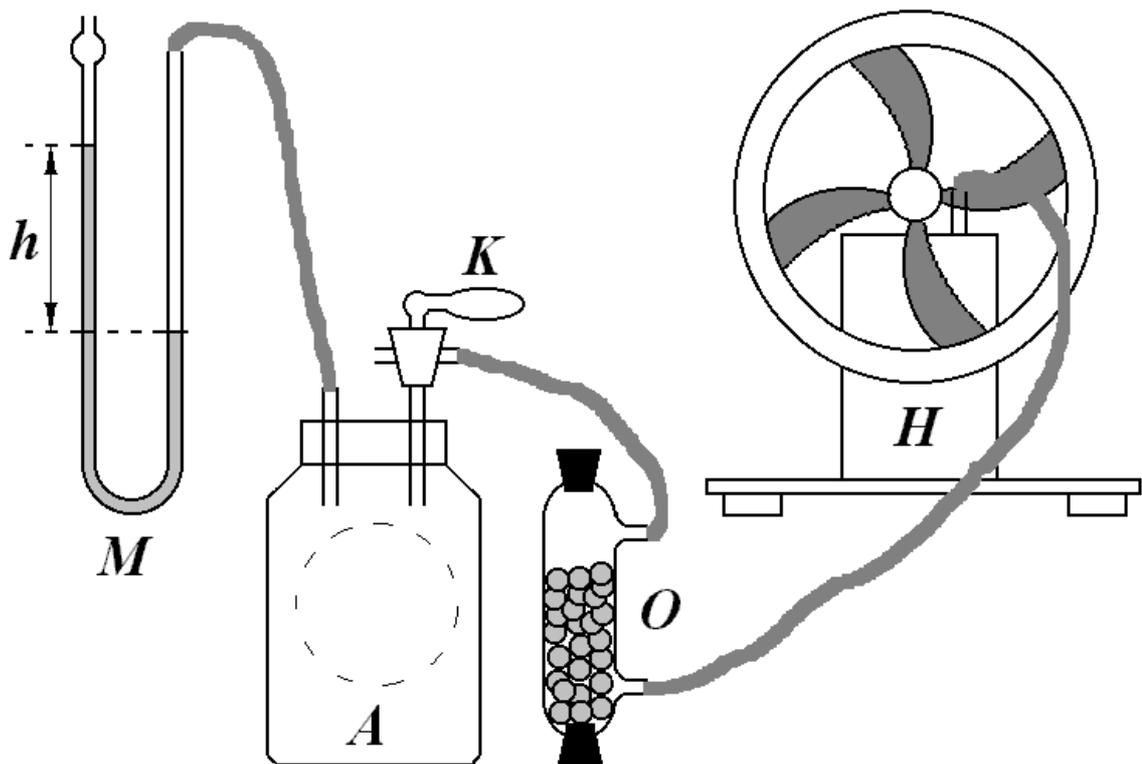


Рис. 1. Схема установки для определения  $C_p/C_v$  методом Клемана и Дезорма. А – сосуд; О – осушитель; М – манометр; К – кран, соединяющий сосуд с насосом или атмосферой; Н – насос.

## Описание метода Клемана – Дезорма

Экспериментальная установка для измерения  $\gamma$  состоит из сосуда А большой емкости, жидкостного манометра М и насоса (рис. 1). При помощи крана К сосуд можно соединить с насосом или окружающей атмосферой. В сосуд А с помощью насоса накачивается дополнительно воздух в количестве, соответствующем разности между верхним и нижним уровнями жидкости примерно на 20 делений. Температура воздуха в сосуде в результате сжатия несколько повышается. После прекращения накачивания она будет понижаться до комнатной температуры. Процесс понижения температуры происходит при постоянном объеме, сопровождаясь понижением давления и, следовательно, понижением разности уровней жидкостей в манометре.

После установления температурного равновесия воздух в сосуде будет характеризоваться параметрами  $p_1, V_1, T_0$ , причем  $p_1 = H + h_1$ , где  $H$  – атмосферное давление,  $h_1$  – установившаяся разность уровней жидкости в манометре,  $V_1$  – объем сосуда,  $T_0$  – комнатная температура.

Затем, открыв ненадолго кран К, выпустите часть воздуха из сосуда и, когда шипение воздуха прекратится, закрывают кран К. В результате этой операции происходит адиабатическое расширение газа и температура воздуха понижается до некоторого значения  $T$ , а давление становится равным атмосферному ( $p_2 = H$ ).

Параметры состояния газа в момент закрытия крана:  $P_2, V_2, T$ . Поскольку температура  $T < T_0$ , то воздух в сосуде после закрытия крана начинает изохорически нагреваться за счет получения тепла от окружающей среды. Давление в сосуде при этом повышается, повышается и разность уровней в манометре. Когда температура станет равной  $T_0$ , изменение уровней в манометре прекратится и третье состояние газа будет характеризоваться параметрами  $p_3 = H + h_2, V_2, T_0$ , где  $h_2$  – новая установившаяся разность уровней в манометре.

Выделим мысленно в сосуде произвольную порцию газа, ограниченную замкнутой поверхностью. Эта поверхность на рис. 1 изображена пунктиром. Она играет роль оболочки, в которую заключена рассматриваемая порция газа. В различных процессах газ, заключенный в эту оболочку, будет расширяться и сжиматься, обмениваясь теплом с окружающим газом. В моменты отсчета давления

параметры, характеризующие состояние газа внутри оболочки, имеют следующие значения:

1 состояние:  $p_1, T_0, V_1'$

2 состояние:  $p_0, T, V_2'$

3 состояние:  $p_2, T_0, V_2'$

Разность давлений  $p_1 - p_0$  и  $p_2 - p_1$  во много раз меньше атмосферного давления  $p_0$ , а потому для упрощения вычислений с этими разностями можно обращаться как с бесконечно малыми дифференциалами. То же относится и к соответствующим изменениям объема выделенной порции газа. Переход газа из состояния 1 в состояние 2 совершается адиабатически  $\delta Q = 0$ .

Продифференцировав уравнение адиабаты (10), получим:

$$\gamma PdV + VdP = 0 \quad (13)$$

Полагая в уравнении (12)  $dV = V_2' - V_1'$ ;  $dP = P_0 - P_1$ , можно написать:

$$\gamma P(V_2' - V_1') + V(P_0 - P_1) = 0 \quad (14)$$

В состоянии 1 и 3 температуры газа одинаковы, поэтому в этих состояниях будет одинаковым произведением  $PV$ , т.е.  $PV = \text{const}$  и  $PdV + VdP = 0$  или:

$$P(V_2' - V_1') + V(P_2 - P_1) = 0 \quad (15)$$

Решая совместно (13) и (14), найдем:

$$\gamma = (P_1 - P_0) / (P_1 - P_2)$$

Замена  $P = H + h$ ;  $P_0 = H$ ;  $P_2 = H + h_2$  приводит к выражению:

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

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Накачивают насосом воздух в сосуд, кран К должен быть повернут в сторону насоса. Манометр должен показать разность давления в 20 – 25 делений, которое через несколько секунд начнет падать. Закрывают кран К, выждать 1 – 2 минуты, пока воздух, нагретый при адиабатическом сжатии, охладится до температуры окружающей среды (перемещение уровней жидкости в коленах манометра прекратится), произвести отсчет разности высот жидкости в манометре (удобнее использовать нижнюю часть мениска жидкости). Чтобы в сосуд А не попадали пары воды, находящиеся в окружающей среде, воздух предварительно пропускают через осушитель, а на дно сосуда А наливают концентрированную серную кис-

лоту, которая хорошо поглощает пары влаги.

Открывают кран К и в момент, когда прекращается шипение, быстро закрывают кран. Выждав 2 минуты, пока воздух, охлажденный при адиабатическом расширении, нагревается до температуры окружающей среды (перемещение уровней жидкостей в манометре прекратится), производится отсчет.

По формуле (16) вычисляют значение  $\gamma$ . Опыт повторяют не менее 10 раз. Полученные результаты по определению  $\gamma$  заносят в таблицу и оценивают ошибку измерения, сравнивая значение  $\gamma_{\text{ср}}$  с теоретическим значением  $\gamma_T$ , которое следует рассчитать по формуле (11), принимая воздух за многоатомный газ с числом степеней свободы  $i = 5$ .

Таблица

№	$h_1$	$h_2$	$\gamma$	$\gamma_{\text{ср}}$	$\varepsilon = \frac{\gamma_T - \gamma_{\text{ср}}}{\gamma_T}$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение теплоемкости.
2. Какая величина называется удельной теплоемкостью?
3. Что Вы понимаете под молярной теплоемкостью?
4. В чем состоит содержание первого начала термодинамики? Как математически записывается этот закон?
5. Какие термодинамические процессы Вам известны, и какими уравнениями они описываются?
6. В каких случаях приращение внутренней энергии системы равно подведенному к системе количеству тепла?
7. В каких случаях внутренняя энергия системы постоянна?
8. В каких случаях изменение внутренней энергии системы равно внешней работе, совершенной системой?
9. Запишите связь между  $C_p$  и  $C_V$ .
10. Запишите число степеней свободы для вращательного и колебательного движения многоатомных, линейных и нелинейных молекул (число атомов в молекуле  $n$ ).
11. Запишите значение внутренней энергии одного моля идеального газа, состоящего из многоатомных линейных и нелинейных молекул.
12. Как зависит от температуры теплоемкость газа? Как выглядит график этой зависимости для двухатомного газа?

## Лабораторная работа № 4 ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНИКА

**Цель работы:** Изучить принцип действия холодильника и определить его коэффициент эффективности.

**Принадлежности:** Холодильный агрегат от бытового холодильника; резервуар с маслом; термометр; ваттметр; секундомер.

### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе изучается работа холодильной машины. **Холодильная машина – это система, работающая по циклу, обратному тому, по которому работает тепловая машина.** Тепловая машина потребляет тепло  $Q_n$ , получаемое от нагревателя. Часть тепла  $Q_x$  отдается другому телу – холодильнику, температура которого ниже, чем температура нагревателя. При этом совершается работа, равная:

$$A = Q_n - Q_x \quad (1)$$

В холодильной машине получается энергия в виде механической работы “ $A$ ” и передается рабочему телу. При этом некоторое количество энергии  $Q$  отдается окружающему воздуху.

$$Q_2 = Q_1 + A \quad (2)$$

Также как и тепловая машина, холодильная машина работает по замкнутому циклу, т. е. является циклической машиной. Это значит, что в стационарном режиме работы рабочее тело машины периодически повторяет ряд проходимых им состояний.

Рассмотрим схему работы изучаемой холодильной машины (см. рис. 1) рабочим телом машины является фреон. Эта жидкость,

давление насыщенных паров которой при комнатной температуре составляет около 4 атм. Компрессор **М** сжимает пары фреона до давления около 10 атм., и они постепенно поступают в конденсатор **К**. При сжатии фреон нагревается, т. к. процесс сжатия идет адиабатически. Конденсатор представляет собой длинную трубку, имеющую тепловой контакт с металлической поверхностью – радиатором **Р**. В конденсаторе фреон сохраняется в парообразном состоянии и постепенно охлаждается за счет теплообмена с окружающим воздухом. Радиатор ускоряет процесс охлаждения воздуха. Теплообмен ведет к тому, что в последних витках конденсатора температура на 10 – 15<sup>0</sup>С ниже, чем температура окружающего воздуха.

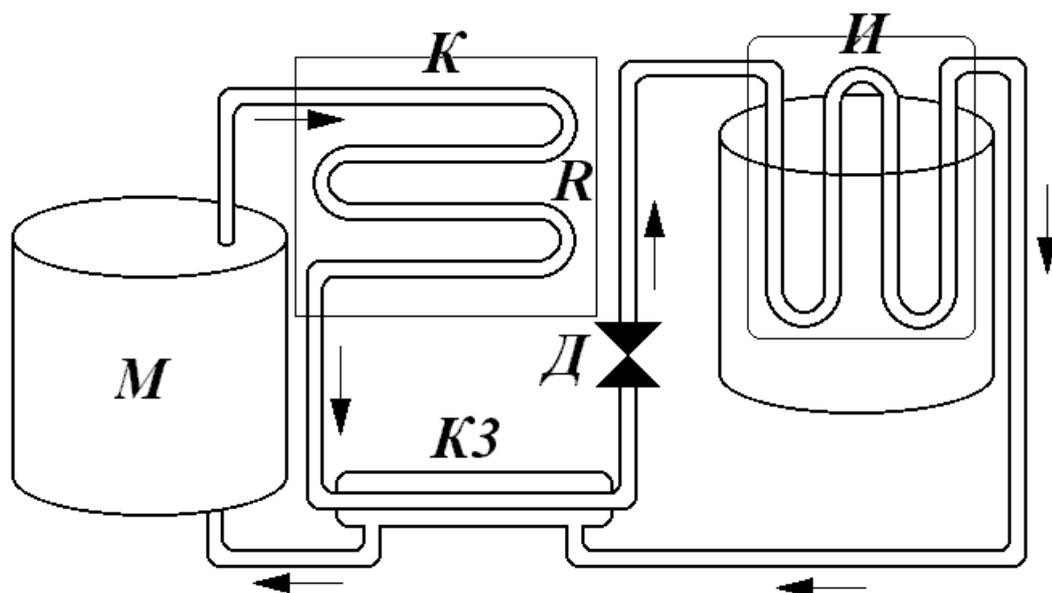


Рис 1. Принципиальная схема холодильника

Поэтому в последних витках конденсатора часть фреона переходит в жидкое состояние. Далее фреон поступает в испаритель через длинный узкий капилляр – дроссель Д. Диаметр трубки конденсатора 3 – 4 мм, а диаметр дросселя – 0,8 мм. На входном конце этого капилляра давление 8 атм., а на выходном конце – около 1 атм. Выходной конец капилляра в испаритель И. Испаритель представляет собой широкую трубку, проложенную в стенках алюминиевого короба. здесь фреон расширяется, давление его резко падает. Фреон закипает, за счет кипения от стенок испарителя отнимается тепло.

После испарителя фреон вновь засасывается компрессором М. Проходя через змеевик КЗ, пары фреона на обратном пути охлаждают трубку конденсатора перед испарителем. Это позволяет более экономично использовать охлаждающее свойство фреона.

Компрессор представляет собой единую замкнутую линию, по которой происходит циркуляция фреона. Эта система изолирована и не сообщается с атмосферой.

Компрессор приводится в движение электромотором, питаемым от сети 220 В.

В данной задаче измеряется одна из характеристик холодильника – коэффициент эффективности. Т. к. в холодильнике совершается превращение механической энергии в тепловую, то обычное понятие КПД здесь не применимо. Под коэффициентом эффективно-

сти будем понимать отношение количество тепла, отобранного у стенок охлаждаемого корпуса “холодильника”, к количеству энергии, затраченной для этого процесса. В нашем случае эта последняя потребляется в виде электроэнергии.

Электрическая схема системы представлена на **рис. 2**. Охлаждаемым объектом является резервуар с маслом **Р**. В резервуар с маслом опущен нагреватель **Н** и морозильная камера с испарителем от холодильного агрегата **Х**. Масло в резервуаре перемешивается мешалкой **М**, вращаемой мотором.

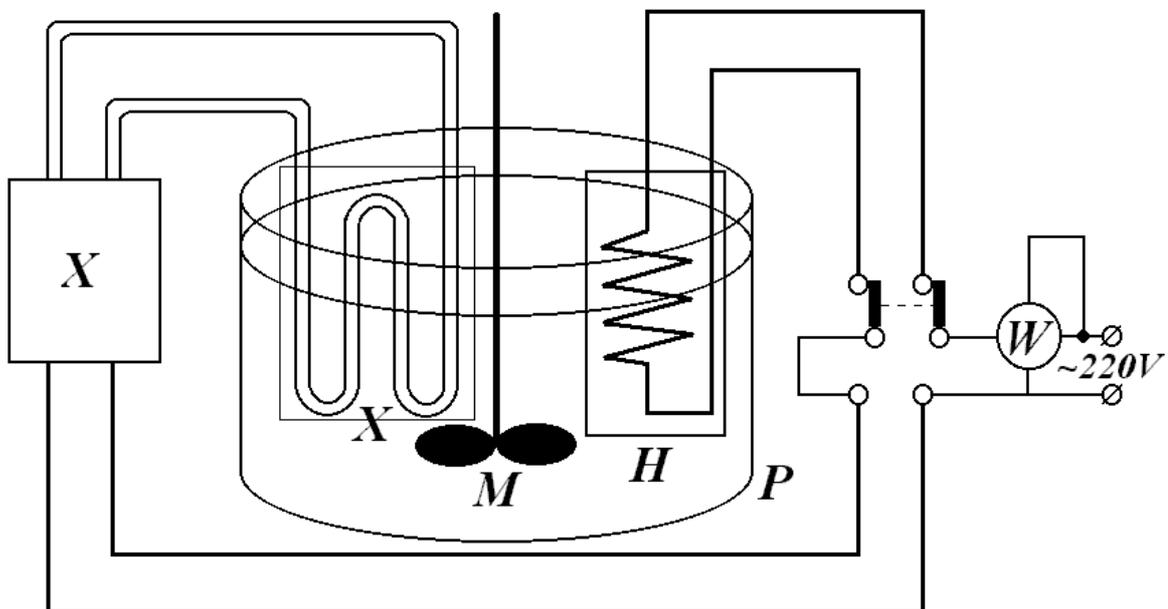


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема холодильника

Теплоемкость резервуара с маслом может быть определена путем нагревания его. если нагреватель выделяет в резервуаре **К** количество энергии  $Q_1 = W_1 \Delta t_1$ , где  $W_1$  – средняя потребляемая мощность нагревателя,  $\Delta t_1$  – время потребления этой мощности. При этом температура резервуара с маслом изменяется на  $\Delta T_1$ , теплоемкость может быть найдена по формуле:

$$C = \frac{Q_1}{\Delta T_1} \quad (3)$$

Зная теплоемкость  $C$ , можно найти коэффициент эффективности холодильной машины. Пусть в течении времени  $\Delta t_2$  холодильный агрегат понизил температуру резервуара с маслом на  $\Delta T_2$ . Тогда ко-

личество отобранного тепла равно  $Q_2 = C \Delta T_2$ . если при этом было затрачено количество электроэнергии, равное  $Q_3$ , то коэффициент эффективности равен:

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_3} \quad (4)$$

## Измерения

### Определение теплоемкости резервуара с маслом.

1. Включить мотор мешалки. Мотор включается в сеть 220 В. Выждать 10 минут, пока в резервуаре не установится стационарная температура. Включить нагреватель. Для этого переключатель Л (см. рис. 2) поставить в положение “нагр.”. Одновременно включить секундомер. Нагрев вести, пока температура масла не увеличится на 1 – 2 градуса. При такой малой разности температур масла и окружающего воздуха теплообменом между ними можно пренебречь. Мощность  $W$  потребляемой электроэнергии измеряется по ваттметру. Выключить нагреватель. Выждать, пока температура масла не достигнет стационарного значения.

2. Во время опыта записывать показания термометра каждые 30 секунд от момента включения нагревателя и до момента его выключения и далее еще в течении 10 минут после выключения нагревателя. построить график температурного хода резервуара с маслом при нагреве.

3. Найти полное изменение температуры масла  $\Delta T_1$ . Рассчитать количество энергии, затраченное на нагрев, и теплоемкость резервуара с маслом по формуле (3).

### Определение коэффициента эффективности холодильника

*Замечание: данное упражнение можно выполнять не менее чем через 10 минут после выключения нагревателя!*

1. Включить холодильник. Для этого ключ перевести в положение “хол.” и одновременно включить секундомер. Т. к. холодильный агрегат не сразу достигает стационарного режима работы, то мощность, поглощаемая им, меняется во времени. Необходимо записывать показания ваттметра через 60 секунд. Охлаждение масла производить на 1 – 2 градуса.

*Внимание! Компрессор не должен работать в непрерывном режиме более 30 минут во избежание перегрева!*

2. По окончании охлаждения выключить холодильник и выждать до установления стационарной температуры.

Во время всего периода охлаждения и еще 10 минут спустя записывать показания термометра через каждую минуту. Построить график температурного хода резервуара с маслом при охлаждении. Найти полное изменение температуры  $\Delta T_2$ . Записать полное изменение температуры.

3. Выключить мотор мешалки. Построить график мощности, потреблявшейся холодильником, в зависимости от времени. По графику найди полную энергию, затраченную на работу холодильника. Для этого ось времени на графике разбить на  $n = 10 - 12$  равных отрезков. Энергия, потребляемая в течении каждого интервала времени  $\Delta t$ , равна произведению длительности интервала времени на среднюю мощность в течении этого интервала  $\Delta t$ .

Полная энергия равна сумме: 
$$Q_3 = \sum_{i=1}^n \bar{W}_i \Delta t$$

4. Пользуясь этим выражением и формулой (4), рассчитать коэффициент эффективности холодильника.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принципиальное различие циклов тепловых и холодильных машин?
2. Запишите формулу для К.П.Д. цикла Карно.
3. Дайте формулировки второго начала термодинамики.
4. Запишите основное уравнение термодинамики, связывающее первое начало со вторым.
5. Приведите принципиальную схему холодильной установки и объясните принцип ее действия.
6. Запишите выражения для К.П.Д. тепловых и холодильных машин. При каких условиях К.П.Д. этих машин больше единицы?
7. Изобразите цикл Карно на диаграмме  $p$ - $V$  ( $p$ - давление,  $V$  – объем).
8. Изобразите цикл Карно на диаграмме  $S$ - $T$  ( $S$ -энтропия,  $T$ -температура).

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

**Цель работы:** Изучение электроизмерительных приборов, Измерение сопротивления методом вольтметра и амперметра.

**Оборудование:** Вольтметр, миллиамперметр, реостат, источник тока.

#### Краткая теория

В основе действия электроизмерительных приборов лежит превращение электрической энергии в другие виды энергии, например, механическую, тепловую, магнитную и т.д. Каждый электрический прибор состоит из двух частей: электрического и отсчетного механизмов. Отсчетный механизм большинства приборов имеет шкалу и указатель. Указатель служит для определения точки шкалы, соответствующей отсчету измеряемой величины.

Электрические приборы находят широкое применение для измерения неэлектрических величин (температуры, времени, давления, скорости движения и т.д.). Принцип измерения состоит в том, что с помощью специальных датчиков неэлектрические величины преобразуются в электрические, которые и подлежат измерению.

Электрические измерения можно производить двумя способами:

- 1) сравнивая электрическую величину с ее эталоном (эталонные ЭДС, сопротивления, емкости, индуктивности и т.д.);
- 2) с помощью приборов непосредственной оценки, шкалы которых заранее проградуированы и показывают числовое значение измеряемой величины.

По своему назначению основные электроизмерительные приборы могут быть классифицированы следующим образом:

1. Приборы, предназначенные для измерения силы тока – амперметры, миллиамперметры, микроамперметры.
2. Приборы для измерения напряжения – вольтметры и милливольтметры.
3. Приборы для измерения электрической мощности - ваттметры.
4. Приборы для измерения электрической энергии - счетчики электрической энергии.
5. Приборы для измерения электрического сопротивления - омметры.

6. Приборы для измерения частоты переменного тока – частотомеры.

7. Приборы для измерения емкости, индуктивности и т.д.

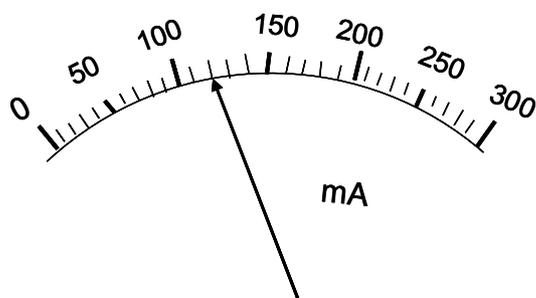
По принципу действия электроизмерительные приборы подразделяются на следующие системы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, тепловые, индукционные, вибрационные, электростатические, электронные.

### Чувствительность и цена деления электроизмерительного прибора

Чувствительностью  $S$  электроизмерительного прибора называется отношение линейного или углового перемещения  $d\alpha$  указателя к изменению  $dx$  измеряемой величины

$$S = \frac{d\alpha}{dx} .$$

Величина  $C = \frac{1}{S}$ , обратная чувствительности, называется ценой деления прибора. Она определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление. Например, на рис. 1 показана шкала прибора, рассчитанного на измерение постоянного



тока в пределах от 0 до 300 мА, шкала которого имеет 60 делений. Цена деления такого прибора равна  $\frac{300}{60} = 5 \text{ мА/дел}$ , чувствительность  $C = 0,2 \text{ дел/мА}$ .

Рис. 1.

### Погрешности приборов

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является его погрешность. В качестве действительного значения измеряемой величины принимается величина, измеряемая образцовым прибором. Разность между показанием прибора  $\alpha$  и действительным значением измеряемой величины  $\alpha_0$  называется абсолютной погрешностью  $\Delta\alpha$  :

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0 .$$

Обычно точность измерения характеризуется относительной погрешностью  $\varepsilon$ , которая определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0} \cdot 100\% .$$

В большинстве случаев для характеристики точности приборов используют приведенную погрешность  $\varepsilon_{пр}$ . Приведенной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к предельному значению измеряемой величины  $\alpha_{пр}$ , т.е. наибольшему ее значению, которое может быть измерено по шкале прибора:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{пр}} \cdot 100\% .$$

Необходимость введения приведенной погрешности объясняется тем, что даже при постоянстве абсолютной погрешности по всей шкале прибора относительная погрешность по мере уменьшения значений измеряемой величины не является постоянной, а увеличивается. Точность электроизмерительных приборов является их важнейшей характеристикой и лежит в основе деления приборов на классы. Согласно ГОСТу по степени точности измерения приборы делятся на семь классов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Показатель класса определяет приведенную погрешность измерения в %. Например, абсолютная погрешность прибора  $\pm 0,2$  А, Наибольшее значение шкалы 5 А. Тогда имеем:  $\frac{0,2 \cdot 100\%}{5} = 4\%$ , т.е. прибор четвертого класса. Абсолютная погрешность  $\Delta \alpha$  определяется по формуле:

$$\Delta \alpha = \pm \frac{\text{Предельное значение шкалы} \cdot \text{класс точности}}{100} .$$

Например, если предельное значение шкалы миллиамперметра равно 300 мА, а его класс точности равен 1,5 то

$$\Delta \alpha = \pm \frac{300 \cdot 1,5}{100} = \pm 4,5 \text{ мА} .$$

Приборы классов 0,1; 0,2; 0,5 применяются для точных лабораторных измерений и называются прецизионными. В технике используются менее точные приборы классов 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0. Класс прибора обычно указывается на его шкале.

## **Классификация приборов по принципу действия**

**1. Магнитоэлектрическая система.** Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы предназначаются для измерения силы тока в цепях постоянного тока.

Работа приборов данной системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с подвижной катушкой, по которой протекает измеряемый ток. Устройство прибора показано на рис.2.

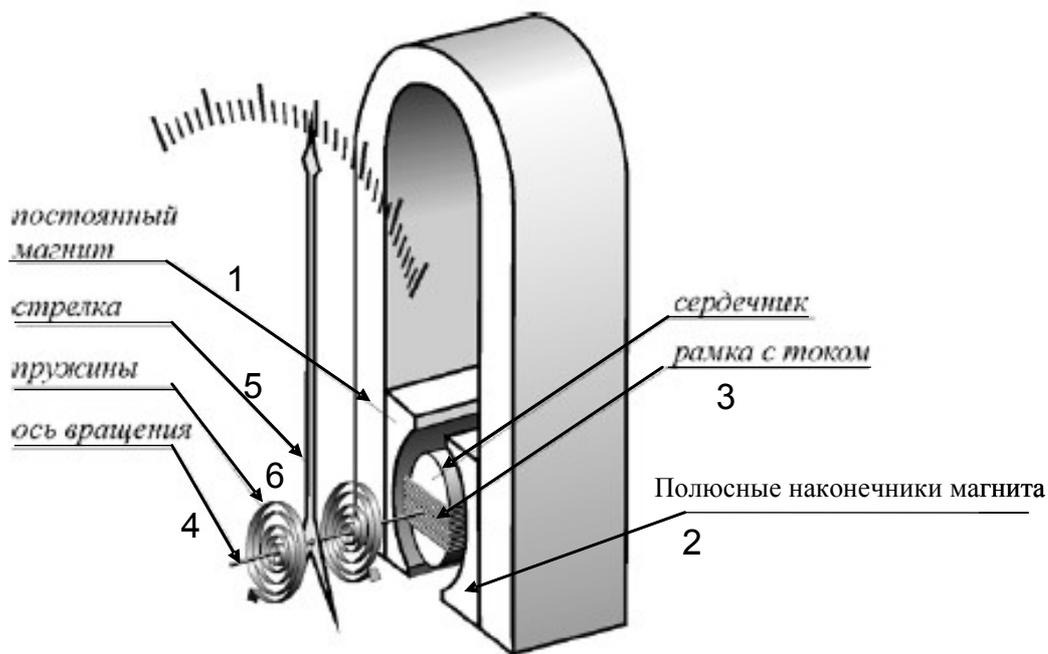


Рис. 2. Устройство прибора магнитоэлектрической системы.

Магнитное поле создается сильным постоянным магнитом 1. Между полюсными наконечниками 2 магнита может свободно поворачиваться на оси рамка 3. Рамка состоит из алюминиевого каркаса прямоугольной формы с намотанной проволокой. На оси вращения 4 укреплена стрелка 5, конец которой перемещается по шкале с делениями.

Взаимодействие тока, проходящего по обмотке, с магнитным полем постоянного магнита приводит к возникновению вращающего момента  $M_1 = k_1 J$ , под действием которого рамка стремится повернуться вокруг оси 4. Противодействующий вращающий момент  $M_2$  создается спиральными пружинами 6, закрученными в противоположные стороны. При этом

$M_2 = k_2 \cdot \alpha$ , где  $\alpha$  – угол закручивания пружины. При равновесии:  $M_1 = M_2$ . Тогда  $\alpha = k J$ , где  $k = k_1/k_2$ .

Пропорциональная зависимость между током и углом отклонения стрелки обеспечивает равномерность шкалы прибора. В силу того, что каркас подвижной рамки сделан из алюминия, т.е. из проводника, то возникающие в нем при движении в магнитном поле индук-

ционные токи создают (по правилу Ленца) тормозящий момент, что приводит к быстрому затуханию возникающих колебаний стрелки.

Достоинствами магнитоэлектрических приборов являются:

- высокая чувствительность и точность показаний;
- нечувствительность к внешним магнитным полям;
- малое потребление энергии;
- равномерность шкалы;
- апериодичность (стрелка быстро устанавливается на соответствующем делении почти без колебаний).

К недостаткам приборов этой системы относятся: возможность измерений только в цепи постоянного тока, чувствительность к токовым перегрузкам.

**2. Электромагнитная система.** Приборы электромагнитной системы предназначаются для измерения силы тока и напряжения в цепи переменного и постоянного тока.

Поместим подвижный ферромагнитный сердечник вблизи неподвижной катушки на ее оси так, как показано на рис. 3.

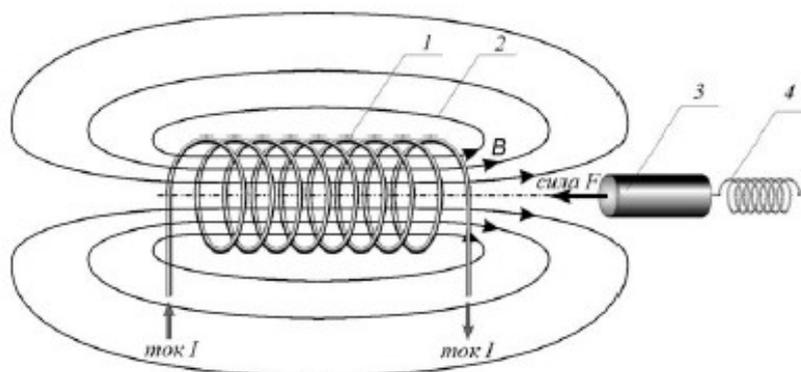


Рис. 3. Принцип действия электромагнитного прибора. 1 – катушка с током, 2 – силовые линии магнитного поля, 3 – ферромагнитный сердечник, 4 – пружина.

При протекании тока  $I$  по катушке возникает магнитное поле  $B$ . Ферромагнитный сердечник намагничивается и втягивается в область более сильного магнитного поля, т.е. в катушку. Сила притяжения уравнивается механической противодействующей силой, создаваемой пружиной. При изменении направления тока изменяется направление магнитного поля, но при этом изменяется и направление ориентации магнитных диполей в ферромагнетике. Поэтому ферромагнетик по-прежнему втягивается в катушку. Устройство одного из приборов электромагнитной системы представлено на рис. 4. Ферромагнитный сердечник специальной фор-

мы, соединенный со стрелкой, закреплен эксцентрично на оси и может входить в щель катушки, поворачиваясь вокруг оси.

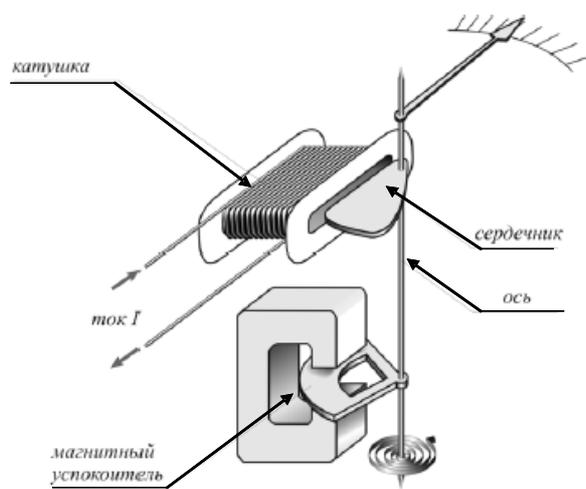


Рис. 4. Устройство прибора электромагнитной системы

Магнитный успокоитель служит для сокращения времени колебаний стрелки.

Сила, втягивающая сердечник в катушку  $F \sim \frac{\partial (JB)}{\partial x}$ , где  $J$  – намагниченность ферромагнетика;  $x$  – координата, направленная вдоль действия силы. В итоге получается, что ферромагнитный сердечник втягивается в катушку с силой, пропорциональной квадрату тока. Это означает, что в электромагнитном приборе вращающий момент  $M_1 = k_1 I^2$ , где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора. Противодействующий момент, создаваемый пружинами, пропорционален углу поворота подвижной части прибора:

$$M_2 = k_2 \alpha .$$

Из условия равновесия  $M_1 = M_2$  следует

$$\alpha = k I^2 .$$

Это выражение показывает, что шкала электромагнитного прибора неравномерная. Однако, шкала прибора линейна по току за исключением небольшого участка в начале шкалы. Линейность шкалы обеспечивается специальной формой сердечника, когда по мере втягивания сердечника в катушку большая часть ферромагнетика перемещается в более однородное магнитное поле, которое втягивает сердечник с меньшей силой.

## Многопредельные приборы

Измерительный прибор, электрическую схему которого можно переключать на необходимый интервал пределов измерения электрической величины, называется многопредельным. В случае амперметров изменение пределов достигается включением различных шунтов, а в случае вольтметров – включением добавочных сопротивлений.

Использование многопредельных приборов связано с тем обстоятельством, что часто требуется измерять электрические величины в очень широких пределах с достаточной степенью точности в каждом интервале. В этом случае многопредельный прибор заменяет несколько одностипных приборов с различными интервалами измерения. Например, при снятии анодных характеристик трехэлектродной лампы величина анодного тока в зависимости от анодного напряжения (при постоянном потенциале сетки) может изменяться в пределах от 0 до 30 мА. Если измерения производить прибором, шкала которого рассчитана на 30 мА, то небольшие токи будут измерены с большей погрешностью.

Действительно, пусть класс прибора 1,5. Тогда абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta \alpha = \varepsilon_{\text{пр}} \alpha_{\text{пр}} = 0,015 \cdot 30 \text{ мА} = 0,45 \text{ мА} \approx 0,5 \text{ мА}.$$

При измерении тока в 21 мА относительная погрешность равна

$$\varepsilon_1 = \frac{0,5}{21} \cdot 100\% = 2,4\%$$

Если же измерять ток тем же прибором в 1 мА, то относительная погрешность будет

$$\varepsilon_2 = \frac{0,5}{1} \cdot 100\% = 50\%$$

В таких случаях многопредельный прибор переключают на меньший предел, чтобы стрелка отклонялась на максимальный угол, но не выходила за пределы шкалы. Иными словами, многопредельный прибор следует включать так, чтобы относительная погрешность была минимальной.

## Измерение сопротивления

Для измерения сопротивления применяются различные методы. Наиболее простой из них – *метод вольтметра и амперметра* (рис. 5). Недостатком этого метода является то, что приборы вносят систематическую ошибку в измерения. Рассмотрим две схемы.

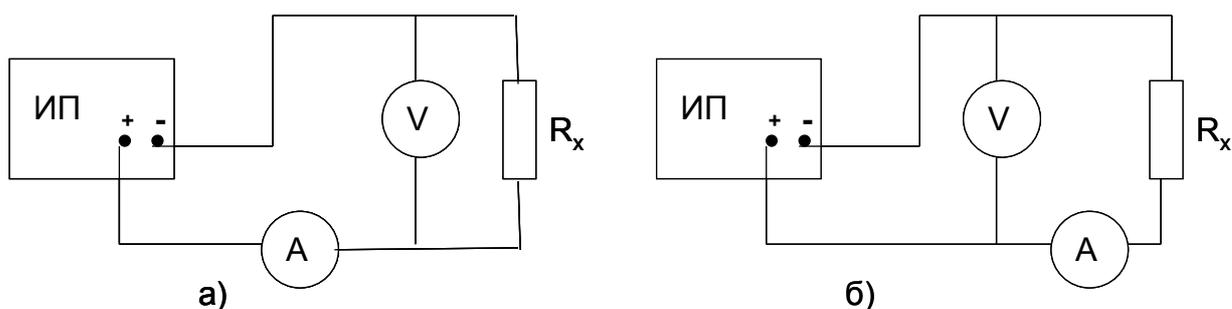


Рис. 5. Схема для измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра

В схеме (а) амперметр измеряет суммарный ток через  $R_x$  и вольтметр. В схеме (б) вольтметр измеряет суммарное падение напряжения на  $R_x$  и на амперметре. Необходимо учитывать, что приборы вносят искажения, и принимать меры к их уменьшению.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с электроизмерительными приборами.
2. Собрать схему (рис. 5 б). В качестве  $R_x$  использовать реостат по указанию преподавателя.
3. По шкалам приборов записать характеристики вольтметра и миллиамперметра, используемых в работе. Заполнить таблицу 1.

Таблица 1.

Наименование прибора	Фабричный номер	Класс точности	Пределы измерений	Цена деления	Внутреннее сопротивление	Максимальная абсолютная погрешность

4. Измерить напряжение  $U$  и силу тока  $I$  (5 – 6 раз), постепенно увеличивая напряжение так, чтобы  $U$  изменялось от небольшого до максимального значения, дозволяемого выбранным пределом измерения прибора. Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2.

№ п/п	$U_i$		$I_i$	
	Дел.	В	Дел.	мА

5. Построить график зависимости  $U$  от  $I$ ; экспериментальные значения нанести с интервалом приборных погрешностей.
6. По наклону графика определить величину  $R_x$ . Оценить ошибку измерения  $R_x$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон Ома для постоянного тока для однородного участка цепи в интегральной и дифференциальной форме.
2. Сформулируйте закон Ома для постоянного тока для неоднородного участка цепи.
3. Как рассчитать сопротивление цепи при последовательном и параллельном соединении  $n$  проводников.
4. Как определить цену деления шкалы многопредельного прибора?
5. Рассчитайте абсолютную ошибку измерений, если Вам известен класс точности прибора.
6. Как рассчитать по классу точности прибора относительную ошибку измерений?
7. На каком принципе основано действие приборов магнитоэлектрической, электромагнитной системы?

## Лабораторная работа № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Цель работы:** Экспериментальное исследование электростатического поля и описание его при помощи эквипотенциальных поверхностей и силовых линий напряженности. Изучение силовых и энергетических характеристик поля.

**Оборудование:** Ванна с электролитом, источник переменного напряжения 10 В, вольтметр, диэлектрик, реостат.

#### Краткая теория

Все тела в природе способны электризоваться, т.е. приобретать электрический заряд. Наличие электрического заряда проявляется в том, что заряженное тело взаимодействует с другими заряженными телами.

Взаимодействие между покоящимися зарядами осуществляется через электрическое поле. Всякий заряд изменяет свойства окружающего пространства: создает в нем электрическое поле. Поле неподвижных зарядов не меняется со временем и называется электростатическим. Оно проявляет себя в том, что если в некоторую точку пространства поместить пробный электрический заряд, то на него будет действовать сила. *Пробным* называется настолько малый точечный заряд, чтобы при его внесении в поле можно было пренебречь перераспределением заряда на телах, создающих поле.

*Напряженностью* электрического поля называют силу, действующую на единичный положительный пробный заряд:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}}. \quad (1)$$

Если поле создано точечным зарядом  $q_0$ , то сила, действующая на пробный заряд  $q_{\text{пр}}$ , определится из закона Кулона:

$$\vec{F} = k \frac{q_0 q_{\text{пр}}}{\varepsilon r_{12}^3} \vec{r}_{12}, \quad (2)$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на заряд  $q_{\text{пр}}$  со стороны заряда  $q_0$ ,  $\vec{r}_{12}$  – радиус–вектор, проведенный из точки 1, где находится заряд  $q_0$  в точку 2, где находится заряд  $q_{\text{пр}}$ ,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся заряды.

Коэффициент  $k$  зависит от выбора системы единиц измерения. В системе СИ единицей заряда является Кл (Кулон). Сила измеряется в ньютонах, расстояние в метрах. Для согласования единиц измерения с результатами опытов коэффициент  $k$  в системе СИ должен быть равен  $9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ . Этот коэффициент часто представляют в виде  $k = 1/4\pi\epsilon_0$ , где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ , величина  $\epsilon_0$  называется электрической постоянной.

Из соотношений (1) и (2) следует, что точечный заряд  $q_0$  создает вокруг себя электрическое поле с напряженностью:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3} \vec{r}, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус–вектор точки пространства, проведенный из точки, в которой находится заряд  $q_0$ , в точку наблюдения.

Если электрическое поле создается системой зарядов, то напряженность поля в данной точке наблюдения определяется по принципу суперпозиции:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i = \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{r}_i}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_i^3}, \quad (4)$$

где  $q_i$  – величина заряда с номером  $i$ ,  $r_i$  – радиус–вектор точки, в которой определяется напряженность, проведенный из той точки, где находится заряд  $q_i$ .

Для наглядного изображения электрических полей пользуются методом силовых линий. Силовая линия есть математическая линия, направление касательной к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля в той же точке. Линии  $\vec{E}$  точечного заряда представляют собой совокуп-

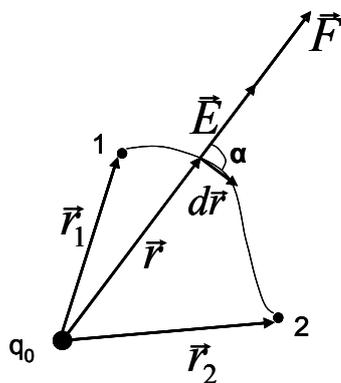


Рис. 1.

ность радиальных прямых, направленных от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен. Линии одним концом опираются на заряд, другим уходят в бесконечность. Работа сил электрического поля, созданного точечным зарядом  $q_0$ , по перемещению заряда  $q$  из точки 1 в точку 2, вычисляется через интеграл (все обозначения на рис. 1).

$$\begin{aligned} A_{12} &= \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{r} = q \int_1^2 E dr \cos \alpha = \\ &= q \int_1^2 E dr = q \int_{r_1}^{r_2} \frac{q_0 dr}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \frac{q q_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что работа сил электростатического поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 не зависит от формы пути, а зависит лишь от положения начальной (1) и конечной (2) точки. Такое поле называется потенциальным.

Работу, совершаемую силами поля при перемещении единичного положительного заряда по произвольному пути из точки 1 в точку 2, называют разностью потенциалов:

$$A'_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) . \quad (6)$$

За единицу потенциала принимается такая разность потенциалов, при которой перемещение единицы заряда сопровождается работой, равной единице. В системе СИ это 1 вольт:  $1\text{В}=1\text{Дж}/1\text{Кл}$ .

Разность потенциалов между точками 1 и 2 можно выразить через напряженность поля:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{r} . \quad (7)$$

**Напряженность поля можно определить, если известны значения потенциала в каждой точке пространства:**

$$\vec{E} = -\nabla \varphi = -\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z} . \quad (8)$$

Векторная функция  $\nabla \varphi$  скалярной величины  $\varphi$  называется её градиентом. Из соотношения (8) следует размерность напряженности электрического поля: в системе СИ единицей напряженности является 1 В/м. Поверхность в пространстве, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение, называется эквипотенциальной. На рис. 2 оси  $X$  и  $Y$  являются касательными к эквипотенциальной поверхности  $\varphi = \text{const}$ . Значит в направлении осей  $X$  и  $Y$  потенциал не меняется, а следовательно производные  $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0$ .

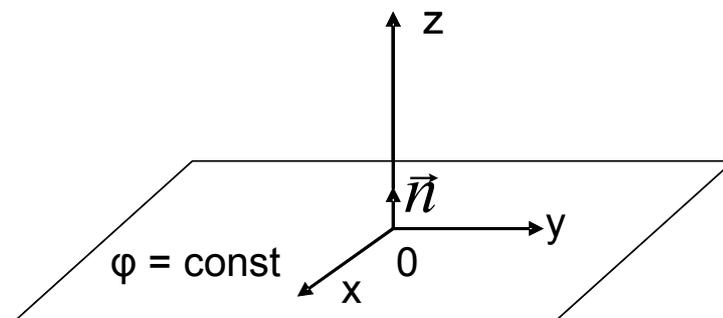


Рис. 2.

Ось  $Z$  направлена по нормали  $\vec{n}$  к эквипотенциальной поверхно-

сти в сторону возрастания величины потенциала. Так как только производная  $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$  отлична от нуля, то  $\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{n}$ , значит, функция  $\varphi$  наиболее быстро возрастает в направлении нормали  $\vec{n}$  к эквипотенциальной поверхности.

Поскольку вектор  $\vec{E} = -\nabla \varphi$ , то он направлен в сторону наибольшего убывания потенциала. Силовые линии электростатического поля нормальны к эквипотенциальным поверхностям.

Разность потенциалов двух точек электрического поля называют *напряжением* и его измеряют, как и потенциал, в вольтах:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}. \quad (9)$$

В однородном электрическом поле (например, между близко расположенными параллельными равномерно заряженными пластинами) силовые линии прямолинейны, параллельны и густота их везде одинакова, т.е.  $\vec{E} = const$  и  $|\nabla \varphi| = \frac{U}{d}$ , (10)

где  $d$  - расстояние между пластинами.

Формулы (8) и (10) широко используются для практических расчетов.

**Метод исследования.** В работе используется электрическое поле токов в электролите, потому что линии тока в электролите совпадают с линиями напряженности электрического поля. Это следует из закона Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}, \quad (11)$$

где  $\vec{j}$  - вектор плотности тока,  $\gamma$  - удельная электропроводность электролита.

Протекание постоянного тока через электролит сопровождается электролизом, вследствие чего поле токов может отличаться от электростатического поля. Чтобы исключить эффект электролиза, электростатическое поле моделируют полем переменных токов низкой частоты. Поскольку расстояние между электродами в ванне с электролитом мало, токи частотой 50 Гц можно считать квазистационарными и структуру поля этих токов - аналогичной структуре электростатического поля.

Схема установки для измерения потенциала точек в электролитической ванне показана на рис. 3. Electroды стоят на плоском горизонтальном дне ванны. В ванну налит тонкий ровный слой электролита (водопроводная вода) толщиной 1 см. Потенциал точек в элек-

тролите, а также потенциал электрода  $\mathcal{E}_0$  измеряются вольтметром с помощью зонда.

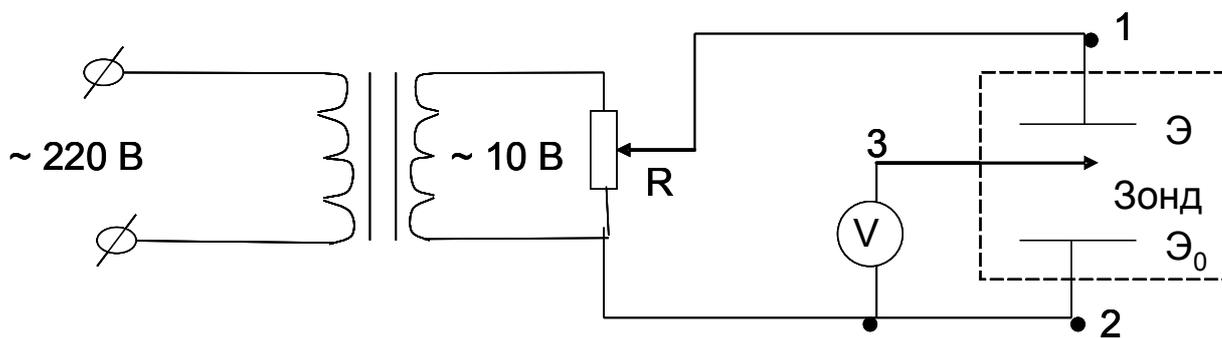


Рис. 3.

Поле токов в плоскопараллельном слое электролита можно рассматривать как сечение соответствующего объемного электростатического поля. Силовые линии поля должны быть перпендикулярны к поверхности электродов, так как поверхность электродов можно считать эквипотенциальной, поскольку проводимость электрода значительно выше проводимости электролита. Поэтому в малом объеме электролита, прилегающем к электроду, электрическое

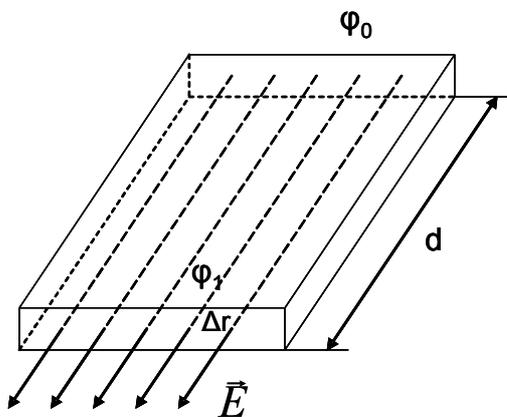


Рис. 4.

поле можно считать однородным. Если на расстоянии  $d$  от электрода  $\mathcal{E}_0$ , имеющего  $\varphi_0 = 0$ , располагается эквипотенциальная поверхность потенциала  $\varphi_1$  (рис. 4), то напряженность поля  $E_x$  в выбранном объеме можно рассчитать по формуле (10). Примем малый объем в виде прямоугольного параллелепипеда, две грани которого совпадают с эквипотенциальными поверхностями  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  (рис. 4). В этом объеме силовые линии пересекают

только грань с потенциалом  $\varphi_1$ . Если ее площадь  $\Delta S$ , то формула теоремы Гаусса будет иметь вид:  $E_x \Delta S = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0 \epsilon}$ . Отсюда плотность избыточного заряда на поверхности электрода:

$$\sigma = \frac{\sum q_i}{\Delta S} = \epsilon_0 \epsilon E_x \quad (12)$$

Для воды при  $T = 283^0 \text{ К}$ ,  $\epsilon = 80$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физические величины называют напряженностью и потенциалом электрического поля? Запишите выражение для потенциала точечного заряда.
2. Запишите выражения для напряженности поля: точечного заряда, бесконечной однородно заряженной плоскости; двух разноименно заряженных плоскостей; бесконечного однородно заряженного цилиндра; равномерно заряженной сферической поверхности; поле равномерно заряженного шара.
3. Какая поверхность называется эквипотенциальной?
4. Объясните расположение линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей для исследованного поля.
5. Запишите связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
6. Сформулируйте теорему Гаусса.
7. Как рассчитать работу по перемещению заряда в электростатическом поле?

## Лабораторная работа №7

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ КАТУШЕК

**Цель работы:** Изучение явления самоиндукции, определение коэффициента самоиндукции катушек.

**Оборудование:** Исследуемая катушка, сердечник, амперметр, вольтметр, реостат, источник постоянного и переменного тока, ключ.

**Примечание.** Источник постоянного и переменного тока рассчитан на включение в электрическую сеть трехфазного тока напряжением 220 В или в сеть однофазного тока напряжением 220 и 127 В частотой 50 Гц.

Номинальным режимом эксплуатации источника переменного и постоянного тока является 45 минут непрерывной работы с последующим выключением в течение не менее 15 минут.

#### Краткая теория

Если к концам проводника с активным сопротивлением  $R_0$  приложена переменная ЭДС величина которой в каждый момент времени  $t$  определяется уравнением:

$$U = U_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Где  $U_0$  амплитуда, а  $\omega$  круговая частота, то в нём возникает переменный электрический ток сила которого в тот же момент времени определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_0} = \frac{U_0}{R_0} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \text{ где } I = \frac{U_0}{R_0} \quad (2)$$

Если же помимо сопротивления  $R_0$  в цепи имеется индуктивность, характеризуемая коэффициентом самоиндукции  $L$ , то под действием той же электродвижущей силы возникает ток силой

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \text{ где } I = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}}, \quad (3)$$

здесь  $\varphi$  - сдвиг фаз между током и напряжением, определяемый из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R_0}. \quad (4)$$

Из сопоставления уравнений (1) и (3) следует, что в этом случае ток отстает по фазе от напряжения.

Величина  $R_1 = \sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}$  носит название полного сопротивления. Величина же  $\omega L$  называется индуктивным сопротивлением.

В формулу (2) входят  $I_0$  и  $U_0$  - максимальные значения токов и напряжений. Но так как измеряемые приборами эффективные значения этих величин  $I_{эфф}$  и  $U_{эфф}$  связаны с максимальными посредством формул:

$$I_0 = I_{эфф} \sqrt{2}, \quad U_0 = U_{эфф} \sqrt{2},$$

то получим:

$$I_{эфф} = \frac{U_{эфф}}{R_0}; \quad (5)$$

$$I_{эфф} = \frac{U_{эфф}}{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{U_{эфф}}{R_1}. \quad (6)$$

В этих формулах под  $R_0$  следует понимать сумму всех активных сопротивлений цепи (в том числе и катушки самоиндукции), на которой измеряется ЭДС. Если разность потенциалов измеряется непосредственно на зажимах катушки, то  $R_0$  есть сопротивление одной лишь катушки.

Из формулы (6) следует, что

$$L = \frac{\sqrt{R_1^2 - R_0^2}}{\omega}, \quad \text{где } R_1 = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}}, \quad (7)$$

$R_0$ - активное сопротивление

$$R_0 = \frac{U_{пост}}{I_{пост}} \quad (8)$$

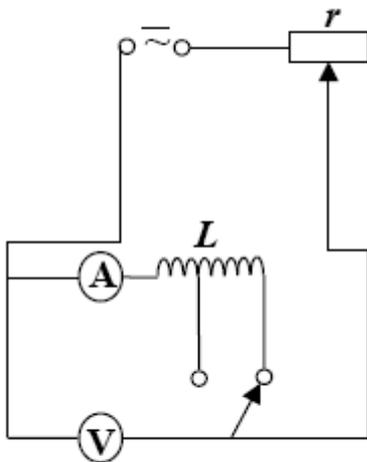


Рис. 1.

Определив величины  $R_1$ ,  $R_0$  и  $\omega$ , найдём, очевидно, и  $L$ . Для этого катушка с неизвестной самоиндукцией  $L$  и активным сопротивлением  $R_0$ , реостат  $r$ , амперметр  $A$  соединяются последовательно (рис.1) и подключаются к клеммам регулируемого напряжения источника постоянного и переменного тока.

Параллельно катушке и амперметру подключается вольтметр. Оба прибора, вольтметр и амперметр, должны работать как на постоянном, так и на переменном токе.

Для определения  $\omega$  необходимо знать период переменного тока  $T = 1/50$  сек и, следовательно

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 100\pi = 314 \text{ сек}^{-1} \quad (9)$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Для измерения активного сопротивления катушки устанавливают ползунок реостата ( $r$ ) на максимум сопротивления и включают источник на постоянный ток. Напряжение источника подбирают таким, чтобы стрелка амперметра находилась в средней части шкалы. Далее измеряют по приборам силу тока  $I_{пост}$  и напряжения  $U_{пост}$ . Результаты измерений подставляют в формулу (8) и вычисляют значение активного сопротивления для данного числа витков катушки.

При измерениях необходимо иметь в виду следующее:

- источник тока не следует держать включенным дольше, чем это необходимо для производства отсчетов, так как в противном случае катушка нагреется, и сопротивление ее значительно изменится.

- переключение витков катушки  $L$  следует производить при выключенном источнике тока и полностью введенном в цепь сопротивлении реостата.

2. Источник тока переключают на переменный ток. Измеряют значения  $I_{эфф}$  и  $U_{эфф}$ , подставляя в формулу (7) вычисляют значение  $R_1$ .

3. Определяя, таким образом, значения  $R_0$  и  $R_1$  находят при помощи формулы (7) значения  $L$ .

4. Изменяют число витков катушки и повторяют действия, описанные в пунктах 1 – 3.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте правило Ленца.
3. Запишите основной закон электромагнитной индукции.
4. Что называется коэффициентом самоиндукции, в каких единицах он измеряется в системе СИ?

## ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

**Цель работы:** Ознакомиться с принципами измерения емкости конденсатора.

**Оборудование:** Конденсатор, амперметр, вольтметр, реостат, источник переменного и постоянного тока, ключ.

**Примечание.** Источник постоянного и переменного тока рассчитан на включение в электрическую сеть трехфазного тока напряжением 220 В или в сеть однофазного тока напряжением 220 и 127 В частотой 50 Гц.

Номинальным режимом эксплуатации источника переменного и постоянного тока является 45 минут непрерывной работы с последующим выключением в течение не менее 15 минут.

### Краткая теория

Электроемкость – характеристика проводящего тела, мера его способности накапливать электрический заряд. Численно электрическая емкость равна заряду  $q$ , который необходимо сообщить уединенному телу для изменения его потенциала  $\varphi$  на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1)$$

*Единица измерения в СИ:* 1 Ф = 1 Кл/В.

Фарада – единица измерения емкости в СИ – является чрезвычайно большой величиной. Емкость земного шара примерно  $7 \cdot 10^{-4}$  Ф, поэтому обычно пользуются микро-, нано- и пикофарадами.

Уединенные проводники обладают небольшой емкостью. Даже шар таких размеров, как Земля, имеет емкость всего лишь 700 мкФ. Вместе с тем на практике бывает потребность в устройствах, которые при небольшом относительно окружающих тел потенциале накапливали бы на себе («конденсировали») заметные по величине заряды. В основу таких устройств, называемых конденсаторами, положен тот факт, что электроемкость проводника возрастает при приближении к нему других тел. Это вызвано тем, что под действием поля, создаваемого заряженным проводником, на поднесенном к нему теле возникают индуцированные (на проводнике) или связанные (на диэлектрике) заряды. Заряды, противоположные по знаку заряду проводника  $q$ , располагаются ближе к проводнику, чем од-

ноименные с  $q$ , и, следовательно, оказывают большее влияние на его потенциал. Поэтому при поднесении к заряженному проводнику какого-либо тела потенциал проводника уменьшается по абсолютной величине. Согласно формуле (1) это означает увеличение емкости проводника.

Конденсаторы делают в виде двух проводников, помещенных близко друг к другу. Образующие конденсатор проводники называют его обкладками. Чтобы внешние тела не оказывали влияния на емкость конденсатора, обкладкам придают такую форму и так располагают их относительно друг друга, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми на них зарядами, было сосредоточено внутри конденсатора. Этому условию удовлетворяют две пластинки, расположенные близко друг к другу, два коаксиальных цилиндра и две концентрические сферы. Соответственно бывают плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы. Поскольку поле заключено внутри конденсатора, линии электрического смещения начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Следовательно, сторонние заряды, возникающие на обкладках, имеют одинаковую величину и различны по знаку.

Конденсатор – это система из двух проводников (обкладок) с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами, форма и расположение которых таковы, что поле сосредоточено в узком зазоре между обкладками.

Основной характеристикой конденсатора является его емкость.

Емкость конденсатора физическая величина, равная отношению заряда  $q$ , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между его обкладками  $\varphi_1 - \varphi_2$ :

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (2)$$

Вычисление емкости представляет собой сложную математическую задачу, и если проводник имеет сложную конфигурацию, то аналитически эта задача не решается. Вычислим емкость плоского конденсатора.

*Плоский конденсатор.* Две параллельные металлические пластины площадью  $S$  каждая, расположенные на расстоянии  $d$  друг от друга и имеющие заряды  $+q$  и  $-q$ . Если расстояние между пластинами значительно меньше размеров пластин:  $d \ll L, H$ , поле между пластинами можно считать однородным. В действительности вблизи краев пластин поле неоднородно (см. рис. 1., на котором показана

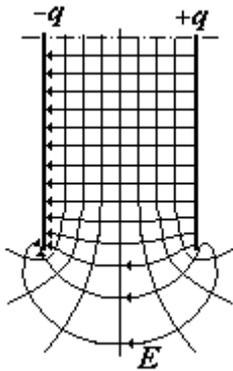


Рис.1.

половина плоского конденсатора, линии со стрелками – это силовые линии, без стрелок – эквипотенциальные поверхности). Учесть эти краевые эффекты трудно. Напряженность поля между обкладками конденсатора  $\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} dx = \frac{\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon}$ , где  $\sigma = q/S$ ,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды. Напряжение между обкладками  $U = E \cdot d = q \cdot d / (\epsilon_0 S)$ . После подстановки в (2) получим

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (3)$$

Для увеличения емкости и варьирования ее возможных значений конденсаторы соединяют в батареи, при этом используется их параллельное и последовательное соединения.

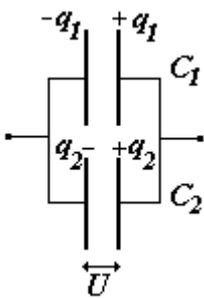


Рис.2. Параллельное соединение

При параллельном соединении конденсаторов емкостью  $C_1, C_2 \dots C_n$  разность потенциалов  $U$  на обкладках конденсаторов одинакова. Полная емкость

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{U} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i U}{U} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

При последовательном соединении конденсаторов емкостью  $C_1, C_2 \dots C_n$  заряды  $q$  всех обкладок равны, а суммарная разность потенциалов:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n \frac{q}{C_i} = \frac{q}{C}$$

откуда

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (5)$$

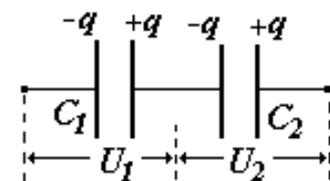


Рис.3. Последовательное соединение.

При последовательном соединении емкость системы всегда уменьшается. Последовательное соединение применяют не для уменьшения емкости, а главным образом для уменьшения разности потенциалов на каждом конденсаторе, чтобы не было пробоя конденсатора.

В проводнике с активным сопротивлением  $R_0$ , к концам которого приложена переменная ЭДС, величина которой в каждый момент времени  $t$  определяется уравнением:

$$U = U_0 \sin \omega t \quad (6)$$

где  $U_0$  - амплитуда, а  $\omega$  - круговая частота, возникает переменный электрический ток, сила которого в тот же момент времени определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_0} = \frac{U_0}{R_0} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \text{ где } I_0 = \frac{U_0}{R_0} \quad (7)$$

Если помимо сопротивления  $R_0$  в цепь переменного тока включена емкость  $C$ , то сила тока выражается формулой:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \text{ где } I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}, \quad (8)$$

здесь  $\varphi$  - сдвиг фаз между током и напряжением, определяемый из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R_0 C \omega}, \quad (9)$$

В таком случае сила тока опережает по фазе напряжение.

Сопротивление цепи  $R_2$  запишется так:

$$R_2 = \sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}, \quad (10)$$

причем величина  $1/(\omega C)$  называется емкостным сопротивлением.

В формулу (7) входят  $I_0$  и  $U_0$  - максимальные значения токов и напряжений. Но так как измеряемые приборами эффективные значения этих величин  $I_{\text{эфф}}$  и  $U_{\text{эфф}}$  связаны с максимальными посредством формул:

$$I_0 = I_{\text{эфф}} \sqrt{2}, \quad U_0 = U_{\text{эфф}} \sqrt{2},$$

то получим:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{эфф}}}{R_0}; \quad (11)$$

$$I_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{эфф}}}{\sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{U_{\text{эфф}}}{R_2}. \quad (12)$$

В этих формулах  $R_0$  следует понимать как сумму всех активных сопротивлений цепи.

Из формулы (12) следует:

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{R_2^2 - R_0^2}}, \quad (13)$$

где  $R_2$  и  $R_0$  суммарное и активное сопротивления цепи, соответственно.

В случае, когда напряжение  $U_{эфф}$  измеряется непосредственно на обкладках конденсатора, формула эта значительно упрощается, ибо активное сопротивление в цепи отсутствует ( $R_0=0$ ).

В этом случае:

$$C = \frac{1}{\omega R_2}. \quad (14)$$

Для определения  $R_2$  поступают следующим образом: соединяют последовательно измеряемый конденсатор  $C$ , амперметр  $A$  и реостат  $r$  и подключают к клеммам источника тока (рис. 4). Параллельно конденсатору присоединяют вольтметр.

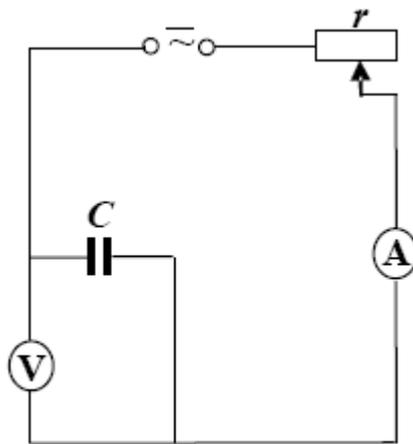


Рис. 4.

Реостат  $r$  служит здесь лишь предохранителем на случай пробоя и короткого замыкания обкладок конденсатора и должен быть включен на максимальное сопротивление.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Замкнуть рубильник на переменный ток и отсчитать по приборам силу тока  $I_{эфф}$  и напряжение  $U_{эфф}$
2. Определить  $R_2$  по формуле:

$$R_2 = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}}, \quad (15)$$

подставить это значение в формулу (14) и вычислить  $C$ .

3. Повторить пункты 1 и 2 для второго, третьего и четвертого конденсаторов.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Конденсаторы. Назначение и применение.
2. Что такое емкость конденсатора, в каких единицах она измеряется в системе СИ?
3. Плоский конденсатор (линии напряженности, величина вектора напряженности, выражение для емкости).
4. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов в батарее.
5. Какая величина называется емкостным сопротивлением?

## Лабораторная работа №9

### ПРОВЕРКА ПОЛНОГО ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы:** Произвести проверку полного закона Ома для переменного тока.

**Оборудование:** Источник переменного и постоянного тока катушка самоиндукции, конденсатор, амперметр, вольтметр, реостат, ключ.

**Примечание.** Источник постоянного и переменного тока рассчитан на включение в электрическую сеть трехфазного тока напряжением 220 В или в сеть однофазного тока напряжением 220 и 127 В частотой 50 Гц.

Номинальным режимом эксплуатации источника переменного и постоянного тока является 45 минут непрерывной работы с последующим выключением в течение не менее 15 минут.

#### Краткая теория

Если к концам проводника с активным сопротивлением  $R_0$  приложена переменная ЭДС, величина которой в каждый момент времени  $t$  определяется уравнением:

$$U = U_0 \sin \omega t \quad (1)$$

где  $U_0$  - амплитуда, а  $\omega$  - круговая частота, возникает переменный электрический ток, сила которого в тот же момент времени определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_0} = \frac{U_0}{R_0} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \text{ где } I_0 = \frac{U_0}{R_0}. \quad (2)$$

В случае, когда в цепь включены последовательно три величины  $R_0$ ,  $L$ ,  $C$ , сила тока в цепи может быть записана выражением

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \text{ где } I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}, \quad (3)$$

полным сопротивлением при этом является:

$$R = \sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}. \quad (4)$$

Выражение (3) носит название *формулы закона Ома* для переменного тока.

В формулу (3) входят  $I_0$  и  $U_0$  - максимальные значения токов и напряжений. Но так как измеряемые приборами эффективные значения этих величин  $I_{эфф}$  и  $U_{эфф}$  связаны с максимальными посредством формул:

$$I_0 = I_{эфф} \sqrt{2}, \quad U_0 = U_{эфф} \sqrt{2},$$

то получим:

$$I_{эфф} = \frac{U_{эфф}}{R_0}; \quad (5)$$

$$I_{эфф} = \frac{U_{эфф}}{\sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} = \frac{U_{эфф}}{R}. \quad (6)$$

В этих формулах  $R_0$  следует понимать как сумму всех активных сопротивлений цепи.

Из формулы (4) случая последовательно включенных сопротивления, самоиндукции и емкости имеем:

$$R = \sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}}. \quad (7)$$

Для проверки этой формулы в цепь переменного тока включают последовательно: катушку самоиндукции с известным активным сопротивлением  $R_0$  и коэффициентом самоиндукции  $L$ , конденсатор с известной емкостью  $C$  (секции которого соединены параллельно), регулирующее сопротивление (реостат)  $r$  и амперметр  $A$  (рис. 1). Параллельно части цепи, содержащей катушку и конденсатор, включают вольтметр  $V$ .

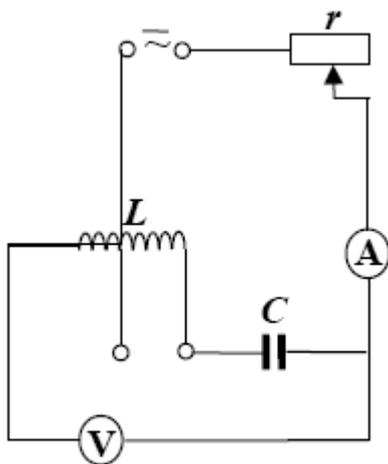


Рис. 1.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить источник на переменный ток.
2. Измерить напряжение  $U_{эфф}$  и силу тока  $I_{эфф}$  (5 – 6 раз), постепенно увеличивая напряжение так, чтобы  $U_{эфф}$  изменялось от небольшого до максимального значения, дозволяемого выбранным пределом измерения прибора. Результаты измерений записать в таблицу.
3. Построить график зависимости  $U_{эфф}$  от  $I_{эфф}$ . По тангенсу угла наклона графика вычислить величину  $R$ .
4. С другой стороны  $R$  можно определить подстановкой в левую часть формулы (7) известных величин  $R_0$ ,  $L$ ,  $C$ .
5. Полученные результаты сравнить для проверки формулы полного закона Ома для переменного тока.

Таблица

№ п/п	$U_{эфф}$		$I_{эфф}$	
	Дел.	В	Дел.	мА

## Контрольные вопросы

1. Вынужденные электрические колебания.
2. Явление резонанса.
3. Какие величины входят в формулу полного закона Ома для переменного тока, в каких единицах они измеряются в системе СИ?
4. Что понимают под величиной  $R_0$ ?
5. Действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения.
6. Полное сопротивление цепи, содержащей последовательно включенные резистор, катушку индуктивности и конденсатор.

## Лабораторная работа № 10

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Цель работы:** Практическое освоение магнитометрического метода измерения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

**Оборудование:** Тангенс-гальванометр, источник постоянного тока, миллиамперметр, реостат, ключ и переключатель.

### Краткая теория

Магнитоэлектрический метод измерения основан на магнитном взаимодействии образца и магнитной стрелки.

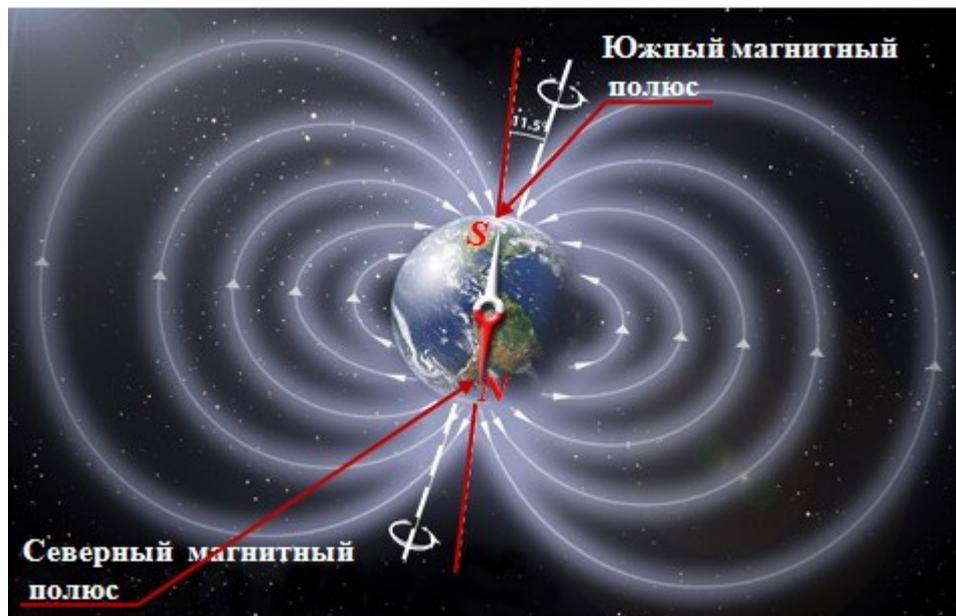


Рис.1. Картина силовых линий Земли.

Земля представляет собой шаровой магнит. Поэтому в любой точке на поверхности Земли и в окружающем пространстве обнаруживается действие магнитных сил. Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими. Южный полюс магнитного поля Земли расположен у северных берегов Америки (примерно  $74^{\circ}$  северной широты и  $100^{\circ}$  западной долготы), а северный полюс - в Антарктиде ( $60^{\circ}$  южной широты и  $143^{\circ}$  восточной долготы). Схема силовых линий магнитного поля Земли показана на рис. 1. Пунктиром показана ось вращения Земли. Направление магнитных силовых линий установлено с помощью магнитной стрелки.

Если подвесить магнитную стрелку на нити так, чтобы точка подвеса совпадала с центром тяжести стрелки, то последняя устанавливается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли. В северном полушарии северный конец стрелки будет наклонен к Земле и она составит с горизонтом угол наклона  $\theta$  (на экваторе этот угол равен 0). Вертикальная плоскость, в которой расположена стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол  $\alpha$  между магнитным и географическим меридианом называется магнитным склонением. Силовой характеристикой любого магнитного поля является индукция  $\vec{B}$ .

Значения  $\vec{B}$  Земли невелики и изменяются от  $0,42 \cdot 10^{-4}$  Тл на экваторе до  $0,7 \cdot 10^{-4}$  Тл у магнитных полюсов. Вектор  $\vec{B}$  можно разложить на две составляющие (рис. 2): горизонтальную  $\vec{B}_Г$  и вертикальную  $\vec{B}_в$ .

Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли определяют с помощью прибора, называемого тангенс-гальванометром.

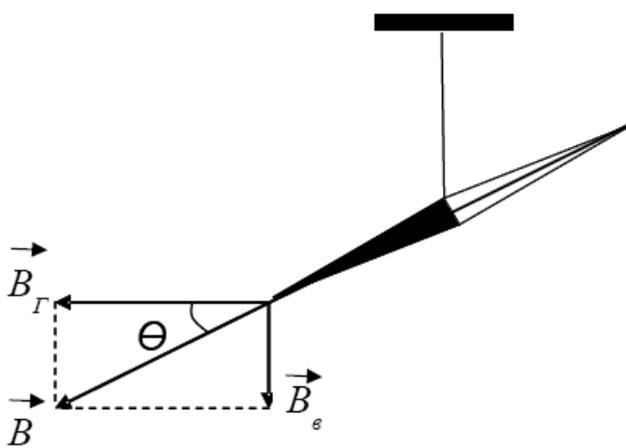


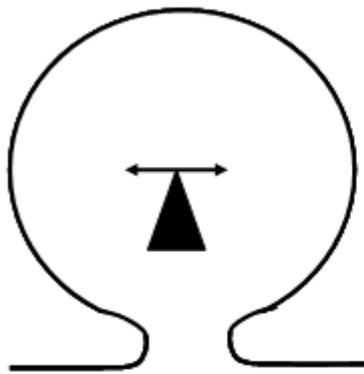
Рис. 2.

Схематически устройство этого прибора показано на рис. 3. Он состоит из катушки - нескольких круговых витков, расположенных вертикально в плоскости магнитного меридиана. В центре помещается магнитная стрелка. Она должна быть небольшой, чтобы можно было принять действующую на полюса стрелки магнитную индукцию равной ин-

дукции в центре кругового тока.

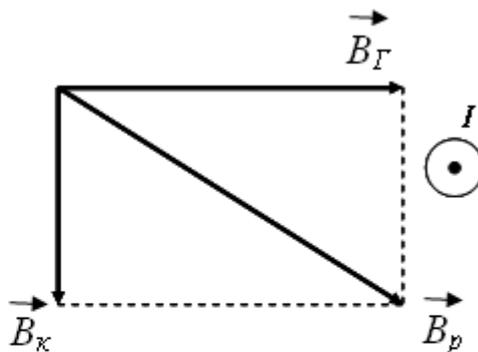
Плоскость контура устанавливается перпендикулярно горизонтальной плоскости так, чтобы она совпала с направлением магнитной стрелки. Ток, протекающий по контуру, создает магнитное поле  $\vec{B}_к$ , действующее на магнитную стрелку и направленное перпендикулярно горизонтальной составляющей индукции поля Земли  $\vec{B}_Г$  (рис. 4).

Под действием горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли и индукции поля контура стрелка устанавливается по направлению равнодействующей  $\vec{B}_р$ .



**Рис. 3.**

Схематическое изображение тангенс-гальванометра.



**Рис. 4.**

Из рис. 4 видно, что

$$B_{\kappa} = B_{\Gamma} \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

Индукция магнитного поля контура в его центре равна

$$B_{\kappa} = \mu_0 \frac{nI}{2r}, \quad (2)$$

где  $n$  – число витков контура,  $I$  – ток, протекающий в контуре (см. рис. 4),  $r$  – радиус контура.

Из (1) и (2) следует:

$$\mu_0 \frac{nI}{2r} = B_{\Gamma} \operatorname{tg} \varphi$$

или

$$B_{\Gamma} = \mu_0 \frac{nI}{2r \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

Следует помнить, что формула (3) является приближенной, т.е. верной только в том случае, когда размер магнитной стрелки много меньше радиуса контура  $r$ . Наименьшая ошибка при измерениях получается при углах отклонения стрелки  $\approx 45^\circ$ . Соответственно этому и устанавливается сила тока в катушке тангенс-гальванометра, который используется в данной работе.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 5.
2. Поворачивая подставку тангенс-гальванометра, установить витки катушки в плоскости магнитного меридиана. Включить ток в цепи и, изменяя его величину реостатом или потенциометром на источнике, добиться поворота стрелки на  $\varphi_1 = 45^\circ$  и зафиксировать значение тока  $I_1$ .

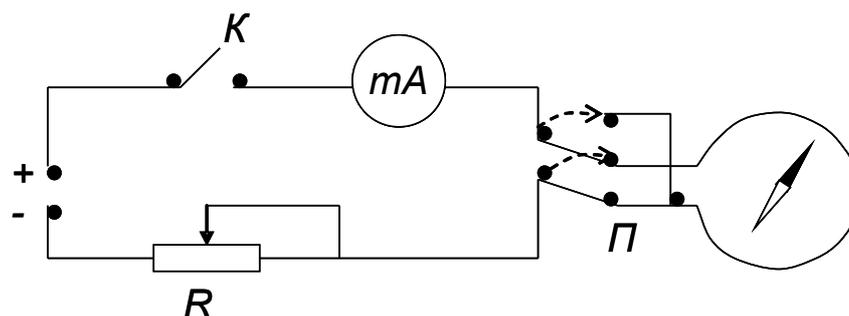


Рис. 5.

3. Переключателем  $\Pi$  изменить направление тока в катушке, добиться отклонения стрелки на  $\varphi_2 = 45^\circ$  и снова зафиксировать значение тока  $I_2$ . Взяв среднее значение токов  $I_1$  и  $I_2$ , вычислить по формуле (3) значение горизонтальной составляющей  $B_H$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая величина называется индукцией магнитного поля?
2. Как проводятся силовые линии магнитного поля?
3. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
4. Чему равна величина индукции магнитного поля прямолинейного тока?
5. Запишите формулу для величины магнитной индукции  $\vec{B}$  в центре кругового тока.
6. Почему измерения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли необходимо проводить при отклонении стрелки тангенс-гальванометра на  $45^\circ$ ?

# ОПТИКА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА. НАБЛЮДЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

**Цель работы:** экспериментальное определение показателя преломления стекла с помощью прибора Гартля с использованием закона преломления Снеллиуса.

**Приборы и оборудование:** прибор Гартля, лазерный излучатель, полуцилиндрическая призма.

### Краткая теория

Свет, падающий на границу раздела двух прозрачных сред, частично отражается от поверхности раздела, а частично проходит внутрь второй среды, изменяя при этом свое направление. Направление распространения светового луча в средах 1 и 2 определяется законом преломления Снеллиуса: преломленный луч лежит в той же плоскости, в которой находится падающий луч и нормаль к поверхности раздела, а отношение синусов угла падения и угла преломления есть величина постоянная для данной пары сред:

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

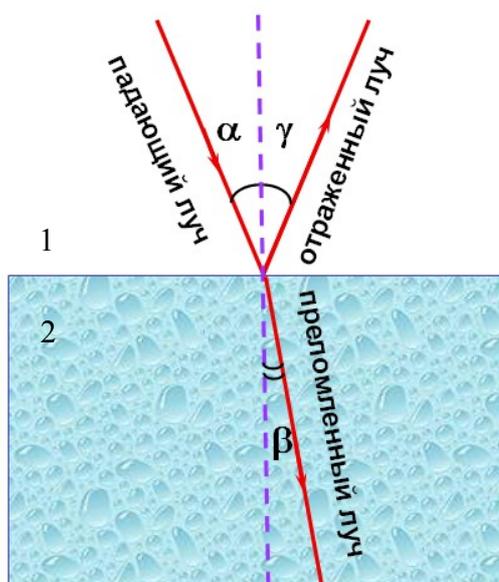


Рис.1. Отражение и преломление луча света на границе раздела двух сред.

Константа  $n_{21}$  называется **относительным показателем преломления** второго вещества по отношению к первому.

Электромагнитная теория Максвелла выяснила простой физический смысл показателя преломления, установив его связь со скоростью распространения света в веществе.

**Абсолютным показателем преломления** вещества называется величина  $n$ , равная отношению скорости света  $c$  в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с) к скорости света в веществе  $v$  в веществе:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (2)$$

Абсолютный показатель преломления показывает, во сколько раз скорость света в вакууме превосходит скорость распространения света в веществе. Относительный показатель преломления двух сред показывает, во сколько раз изменяется скорость света при переходе из первой среды во вторую.

Относительный показатель преломления пары сред есть отношение их абсолютных показателей:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Очевидно, что абсолютный показатель преломления вакуума равен 1.

Для веществ в различных агрегатных состояниях показатели преломления имеют различные значения. Для газообразных веществ значения показателей преломления близки к 1. В геометрической оптике показатель преломления воздуха принимают равным единице, хотя его точное значение 1,000274 (при нормальном давлении и температуре). Величины показателей преломления для жидкостей изменяются в интервале от 1,2 до 1,9. Твердые тела имеют наибольшие значения показателей преломления (от 1,3 до 4,0).

Используя абсолютные показатели преломления, закон преломления (1) удобно переписать в виде:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (4)$$

Произведение показателя преломления среды на синус угла между нормалью и лучом при каждом преломлении есть величина постоянная, называемая оптическим инвариантом.

## Полное внутреннее отражение

Из соотношения (4) видно, что если луч идет из среды оптически менее плотной в среду более плотную (т.е.  $n_2 > n_1$ ), то угол преломления  $\beta$  будет меньше угла падения  $\alpha$ . Если же среды таковы, что  $n_1 > n_2$ , то углы падения и преломления подчиняются неравенству  $\beta > \alpha$ . В этом случае при постепенном увеличении угла падения угол преломления может оказаться равным  $90^\circ$ . Соответствующий ему угол падения называется предельным углом полного внутреннего отражения  $\alpha_{пред}$ . При падении света под большими углами  $\alpha > \alpha_{пред}$ , преломленного луча не существует, свет не выходит из первой среды и имеет место явление полного внутреннего отражения. Рисунок 2 иллюстрирует это явление.

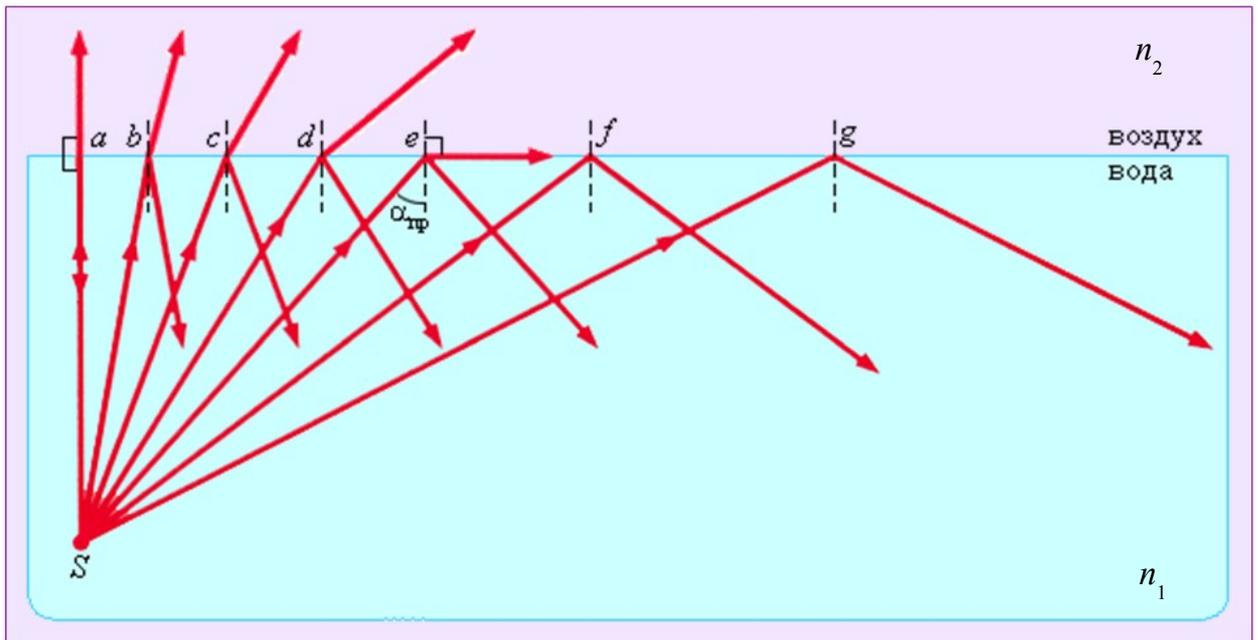


Рис. 2. Возникновение полного внутреннего отражения на границе оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой.

Величина предельного угла определяется соотношением:

$$\frac{\sin \alpha_{пред}}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin \alpha_{пред}}{1} = n_{21}, \text{ или} \quad (5)$$
$$\sin \alpha_{пред} = \frac{n_2}{n_1}$$

Если луч идет из вещества с показателем преломления  $n_1$  в воздух, то  $\sin \alpha_{пред} = \frac{1}{n_1}$ . Следовательно, величину предельного угла можно использовать для определения показателя преломления одной из сред, если известен показатель преломления другой среды.

$$n_1 = \frac{1}{\sin \alpha_{пред}} \quad (6)$$

Явление полного отражения используется в призмах полного отражения. Показатель преломления стекла равен  $n \approx 1.5$ , поэтому предельный угол для границы стекло – воздух равен

$$\alpha_{пред} = \arcsin (1/1,5) = 42^\circ.$$

Поэтому при падении света на границу стекло – воздух при  $\alpha > 42^\circ$  всегда будет иметь место полное отражение. На рисунке 3 (*а* – *в*) показаны призмы полного отражения, позволяющие: *а*) повернуть луч на  $90^\circ$ ; *б*) повернуть изображение; *в*) обернуть лучи. Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя  $\alpha_{пред}$ , находим относительный показатель преломления двух сред, а также абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления другой среды известен). Явление полного отражения используется также в световодах (светопроводах), представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала. В волоконных деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления. Свет, падающий на торец световода под углами, большими предельного, претерпевает на поверхности раздела сердцевинки и оболочки полное отражение и распространяется только по световедущей жиле. Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды. Вопросы передачи световых волн и изображений изучаются в специальном разделе оптики – волоконной оптике, возникшей в 50-е годы XX столетия. Световоды используются в электронно-лучевых трубках, в электронно-счетных машинах, для коди-

рования информации, в медицине (например, диагностика желудка), для целей интегральной оптики и т. д.

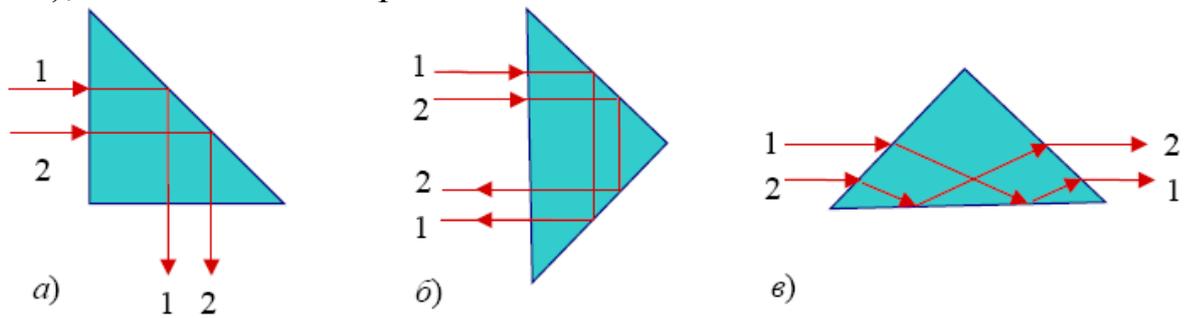


Рис.3. Призмы полного отражения.

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА ГАРТЛЯ

Прибор Гартля представляет собой диск (см. рис. 4-5), который можно поворачивать вокруг своей оси. На диск нанесена шкала для отсчета углов (желтое кольцо, с нанесенными на нем через  $1^\circ$  рисками). В центре диска имеется паз, в который помещается полуцилиндрическая призма. Показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма, равен 1,48. На оси диска укреплены 3 кронштейна: для установки лазерного излучателя, для установки фотодиода и кронштейн со щелью для юстировки луча.



Рис. 4. Прибор Гартля.



Рис. 5. Демонстрация закона Снеллиуса – Декарта с помощью прибора Гартля.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Подготовка прибора к работе

1. Установите призму в паз диска так, чтобы к лазерному излучателю была обращена плоская поверхность призмы.
2. Направьте луч вдоль указателя нормали к поверхности призмы.
3. Убедитесь, что луч от лазера проходит сквозь призму и виден на выходе.

### Упражнение 1. Изучение закона отражения на границе раздела воздух-стекло.

1. **Осторожно** поворачивая диск, установите угол падения луча  $\alpha = 20^\circ$ .
2. Измерьте угол отражения  $\gamma$ .
3. Повторите эти действия для углов падения, равных  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ .
4. Заполните таблицу 1.

Таблица 1

№	угол падения $\alpha$	угол отражения $\gamma$
1	$20^\circ$	
2	$30^\circ$	
3	$40^\circ$	

### Упражнение 2. Изучение закона преломления на границе раздела воздух-стекло.

1. **Осторожно** поворачивая диск, установите углы падения луча  $\alpha$  равными  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ . Для каждого значения  $\alpha$  измерьте угол преломления  $\beta$ .
2. По формуле (1) рассчитайте  $n_{21}$  (относительный показатель преломления стекла по отношению к воздуху).
3. Заполните таблицу 2.
4. Сравните полученное значение с показателем преломления стекла, из которого изготовлена призма. Сделайте вывод.

Таблица 2

№	$\alpha$	$\beta$	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
1	$30^\circ$				
2	$45^\circ$				
3	$60^\circ$				

### Упражнение 3. Изучение явления полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух.

1. **Аккуратно** установите призму в паз диска так, чтобы к лазерному излучателю была обращена полуцилиндрическая плоская поверхность призмы (см. рис.6 а).
2. **Осторожно** поворачивая диск, подберите угол падения луча лазера на плоскую границу раздела стекло-воздух и добейтесь исчезновения преломленного пучка (см. рис.6 б, в).
3. Измерьте угол падения  $\alpha_{пред}$ .
4. По формуле (6) рассчитайте показатель преломления стекла  $n_{эксп}$ , из которого изготовлена призма.
5. Оцените относительную погрешность измерения по формуле

$$\varepsilon = \frac{n_{эксп} - n}{n} \cdot 100\%.$$

6. Сделайте вывод.

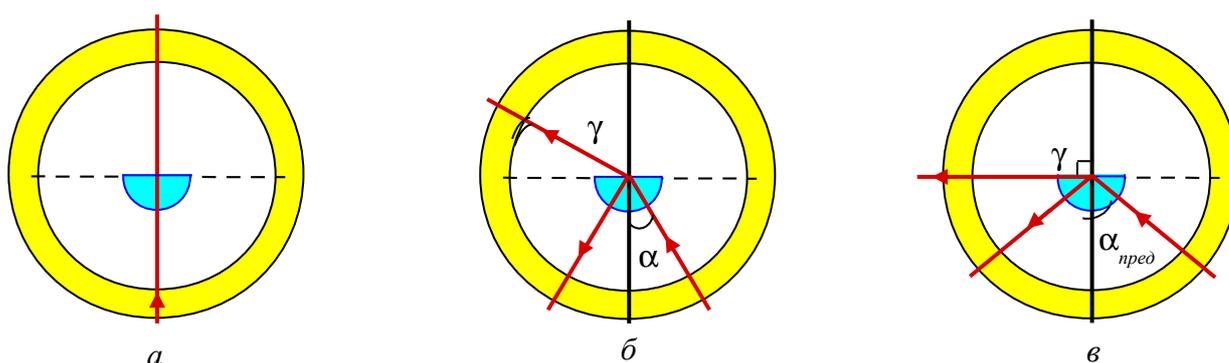


Рис. 6. Определение угла полного внутреннего отражения  $\alpha_{пред}$ .

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какая величина называется абсолютным показателем преломления?
2. Дайте определение относительного показателя преломления.
3. Сформулируйте и проиллюстрируйте законы отражения и преломления.
4. При каком условии имеет место явление полного внутреннего отражения?
5. Может ли возникнуть полное внутреннее отражение, если свет проходит из воды в стекло?
6. В чем заключается принцип работы световодов?

## Лабораторная работа № 12

# ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ И ПРЕЛОМЛЕНИИ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**Цель работы:** экспериментальное определение угла Брюстера с помощью прибора Гартля.

**Приборы и оборудование:** прибор Гартля, лазерный излучатель, полуцилиндрическая призма.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряженностей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости  $\mathbf{v}$  распространения волны (перпендикулярно лучу). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно **светового вектора** — вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля (это обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества).

Свет представляет собой суммарное излучение множества атомов. Атомы же излучают световые волны независимо друг от друга, направление колебаний светового вектора в этих волнах различное, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора.

Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $\vec{E}$  (и, следовательно,  $\vec{H}$ ) называется **естественным**. Свет, испускаемый обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. п.) является естественным.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется **поляризованным**.

Свет, в котором вектор  $\vec{E}$  колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу, называется **плоскополяризованным (линейно поляризованным)**.

Линейно поляризованный свет испускается лазерными источниками. Свет может оказаться поляризованным при отражении. Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые **поляризаторы**, пропускающие колебания только определенного направления (см. рис.1.). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора  $\vec{E}$ , например кристаллы. Из природных кристаллов, давно используемых в качестве поляризатора, следует отметить турмалин (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски).

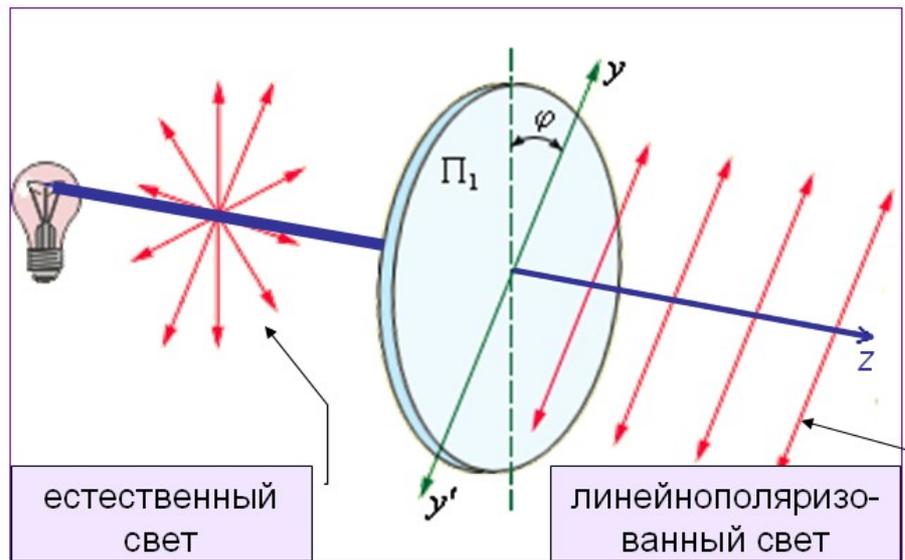


Рис.1. Преобразование естественного света в линейнополяризованный.

Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде (см. рис.2). Устанавливая на пути отраженного и преломленного лучей анализатор (например, турмалин), убеждаемся в том, что отраженный и преломленный лучи частично поляризованы: при повороте анализатора вокруг лучей интенсивность света периодически усиливается и ослабевает (полного гашения не наблюдается!). Дальнейшие исследования показали, что в отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (на рис. они обозначены точками), в преломленном – колебания, параллельные плоскости падения (изображены стрелками).

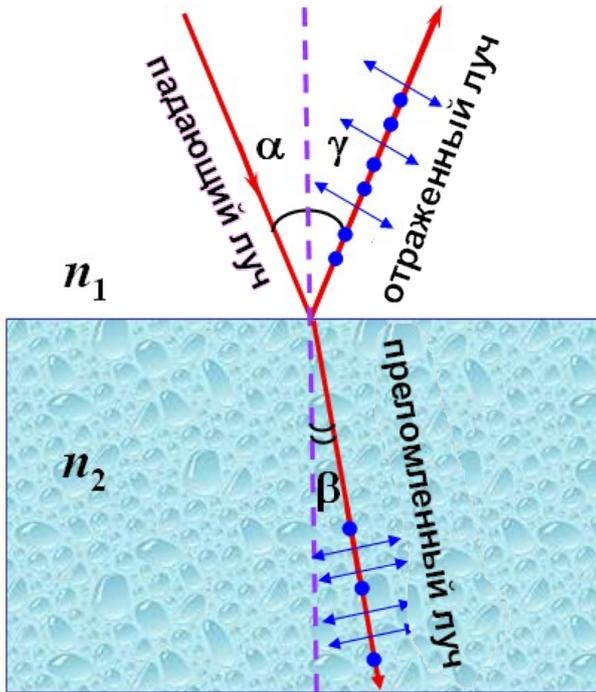


Рис.2. Частично поляризованные отраженный и преломленный лучи. Преобразование естественного света в линейнополяризованный.

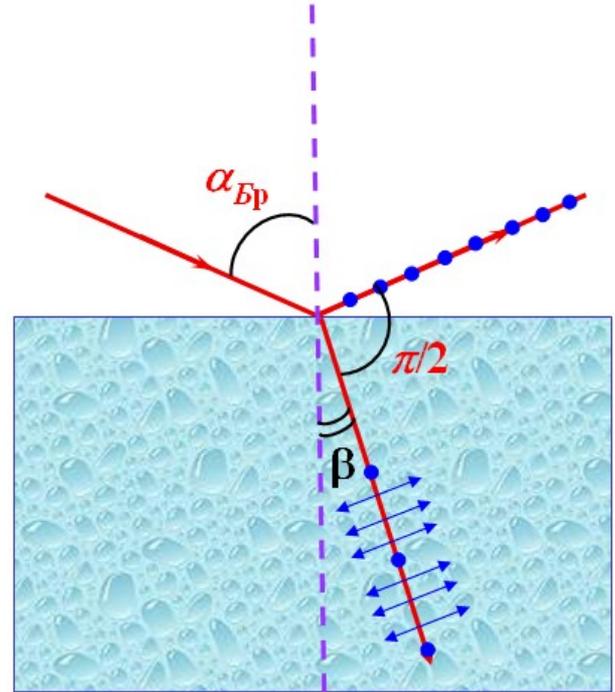


Рис.3. Иллюстрация закона Брюстера.

Степень поляризации (степень выделения световых волн с определенной ориентацией электрического (и магнитного) вектора) зависит от угла падения лучей и показателя преломления. Шотландский физик Д. Брюстер (1781-1868) установил закон, согласно которому **при угле падения  $\alpha_{Br}$  (угол Брюстера), определяемого соотношением**

$$\operatorname{tg} \alpha_{Br} = n_{21} \quad (1)$$

( $n_{21}$  — показатель преломления второй среды относительно первой), **отраженный луч является плоскополяризованным** (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения). Преломленный же луч при угле падения  $\alpha_{Br}$  поляризуется максимально, но не полностью.

Если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи **взаимно перпендикулярны** (см. рис.3).

## ОПИСАНИЕ ПРИБОРА ГАРТЛЯ

Прибор Гартля представляет собой диск (см. рис. 4), который можно поворачивать вокруг своей оси. На диск нанесена шкала для отсчета углов (желтое кольцо, с нанесенными на нем через  $1^\circ$  рисками). В центре диска имеется паз, в который помещается полусферическая призма. Показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма, равен **1,48**. На оси диска укреплены 3 кронштейна: для установки лазерного излучателя, для установки фотодиода и кронштейн со щелью для юстировки луча.



Рис. 4. Прибор Гартля.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Подготовка прибора к работе

1. Установите призму в паз диска так, чтобы к лазерному излучателю была обращена плоская поверхность призмы.
2. Направьте луч вдоль указателя нормали к поверхности призмы.
3. Убедитесь, что луч от лазера проходит сквозь линзу и виден на выходе.

### Упражнение 1. Изучение закона преломления на границе раздела воздух-стекло.

Если свет падает на границу раздела двух сред (двух прозрачных веществ), то падающий луч разделяется на два — отраженный и преломленный (см. рис. 2), направления которых задаются законами отражения и преломления.

Закон преломления света: падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина, постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}, \quad (2)$$

где  $n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

1. **Осторожно** поворачивая диск, установите углы падения луча  $\alpha$  равными  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ . Для каждого значения  $\alpha$  измерьте угол преломления  $\beta$ .
2. По формуле (2) рассчитайте  $n_{21}$  (относительный показатель преломления стекла по отношению к воздуху) для каждого угла падения.
3. Найдите среднее значение относительного показателя преломления стекла  $\langle n_{21} \rangle$ .
4. Сравните полученное значение с показателем преломления стекла, из которого изготовлена призма.
5. Оцените относительную погрешность измерения

$$\varepsilon = \frac{\langle n_{21} \rangle - n}{n} \cdot 100\%. \quad (3)$$

6. Сделайте вывод.
7. Предварительно оцените величину угла Брюстера, воспользовавшись формулой (4)

$$\alpha_{\text{Бр,предварит}} = \text{arctg} \langle n_{21} \rangle \quad (4)$$

8. Заполните таблицу 1.

Таблица 1

№	$\alpha$	$\beta$	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\langle n_{21} \rangle$	$\alpha_{\text{Бр}}$	$\varepsilon, \%$
1	$30^\circ$							
2	$45^\circ$							
3	$60^\circ$							

## Упражнение 2. Определение угла Брюстера

1. Установите угол падения луча лазера на плоскую границу раздела стекло-воздух равный величине  $\alpha_{Бр,предварит}$ , которую вы определили в упражнении 1.
2. **Осторожно** поворачивая диск, добейтесь того, чтобы угол между отраженным и преломленным лучом стал **равен  $90^\circ$**  (см. рис.3).
3. Измерьте угол падения  $\alpha_{Бр}$ .
4. Повторите пункты 1-3 три раза.
5. Рассчитайте среднее значение угла Брюстера  $\langle \alpha_{Бр} \rangle$ .
6. Зная величину показателя преломления стекла, из которого изготовлена призма, предварительно оцените теоретическое значение угла Брюстера по формуле (4).

$$\alpha_{Бр, теоретич} = \text{arctg } n_{стекла} \quad (4)$$

7. По формуле (5) оцените относительную погрешность измерения.

$$\varepsilon = \frac{\langle \alpha_{Бр} \rangle - \alpha_{Бр, теор}}{\alpha_{Бр, теор}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

8. Заполните таблицу 2.

Таблица 2

№	$\alpha_{Бр}$	$\langle \alpha_{Бр} \rangle$	$\alpha_{Бр, теор}$	$\varepsilon, \%$
1				
2				
3				

9. Сделайте вывод.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется естественным?
2. Какой свет называется поляризованным?
3. Какой свет называется линейно поляризованным?
4. Сформулируйте и проиллюстрируйте закон преломления света.
5. Сформулируйте и проиллюстрируйте закон Брюстера.
6. Если свет падает под углом Брюстера, каким образом направлены колебания  $\vec{E}$  в отраженном и преломленном луче?

## Лабораторная работа № 13

### ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА УЗКОЙ ЩЕЛИ И ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ

**Цель работы:** экспериментальное определение размера щели по дифракционной картине, определение периода дифракционной решетки.

**Приборы и оборудование:** лазерный излучатель, оптическая скамья, экран, оправа со щелью 4.1.9., дифракционные решетки 4.1.ДЛ10, 4.1.ДЛ20.

#### Краткая теория

**Дифракцией** называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле – любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики.

Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшие отверстия в экранах и т. д.

Немецкий физик И. Фраунгофер рассмотрел дифракцию плоских световых волн, или дифракцию в параллельных лучах. Дифракция Фраунгофера, имеющая большое практическое значение, наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию.

Рассмотрим дифракцию Фраунгофера от бесконечно длинной щели (для этого практически достаточно, чтобы длина щели была значительно больше ее ширины). Пусть плоская монохромати-

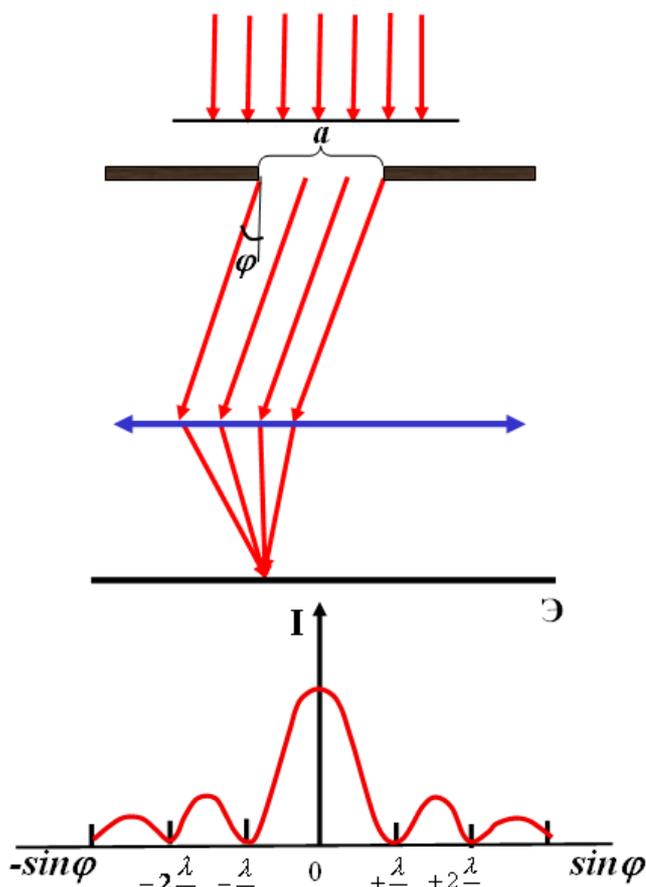


Рис.1. Дифракция Фраунгофера на щели.

ческая световая волна с длиной волны  $\lambda$  падает нормально плоскости узкой щели шириной  $a$  (см. рис.1). Условие наблюдения максимума освещенности на экране в произвольном направлении наблюдения под углом  $\varphi$  имеет вид:

$$a \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (1)$$

Отметим, что в направлении  $\varphi = 0$  свет распространяется с наибольшей интенсивностью, т. е. в точке в центре экрана наблюдается центральный дифракционный максимум.

Дифракционный минимум (полная темнота) наблюдается при выполнении условия:

$$a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda, (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$

Распределение интенсивности на экране, получаемое вследствие дифракции (дифракционный спектр), приведено на рис. 1. Расчеты показывают, что основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме. Из опыта и соответствующих расчетов следует, что сужение щели приводит к тому, что центральный максимум расплывается, а интенсивность уменьшается (это, естественно, относится и к другим максимумам). Наоборот, чем щель шире ( $a > \lambda$ ), тем картина ярче, но дифракционные полосы уже, а число самих полос больше. При  $a \gg \lambda$  в центре получается резкое изображение источника света, т. е. имеет место прямолинейное распространение света.

**Дифракционной решеткой** называется система из щелей равной ширины, разделенных одинаковыми непрозрачными промежутками.

Если ширина каждой щели равна  $a$ , а ширина непрозрачных участков между щелями  $b$ , то величина  $d = a+b$  называется **постоянной (периодом) дифракционной решетки**.

Очевидно, что в тех направлениях, в которых *ни одна* из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться и при двух щелях и при  $N$  щелях, т. е. **прежние (главные) минимумы** интенсивности будут наблюдаться в направлениях, определяемых условием:

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda, (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

Наоборот, действие одной щели будет усиливать действие другой, если

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

т. е. при этих условиях наблюдаются **главные максимумы**.

Кроме того, вследствие взаимной интерференции световых лучей, посылаемых двумя щелями, в некоторых направлениях они будут гасить друг друга, т. е. возникнут **дополнительные минимумы**:

$$d \sin \varphi = \pm k' \frac{\lambda}{N}, \quad (k' = 1, 2, 3, \dots)$$

$k'$  – целое число не кратное  $N$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 1. Изучение дифракции Фраунгофера на узкой щели.

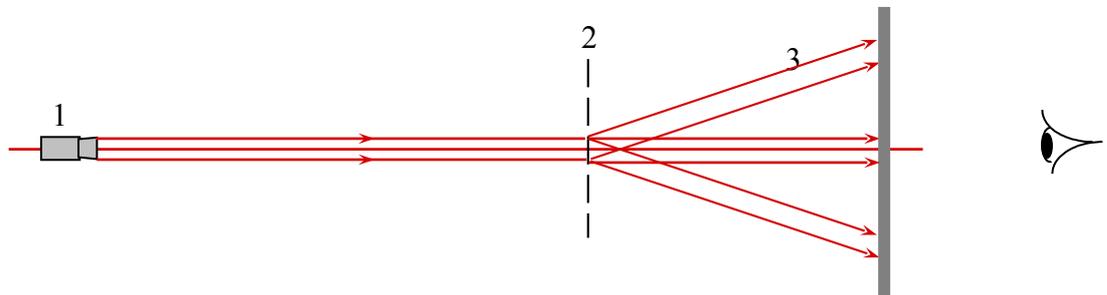


Рис.2. Схема наблюдения дифракционной картины.

1 – лазерный излучатель, 2 – оправа с узкой щелью, 3- экран.

На оптической скамье (см. рис.2) располагают лазерный излучатель (1) и оправу со щелью (2), на экране (3) наблюдают дифракционную картину.

1. Направьте лазерный луч на диафрагму со щелью.
2. Подберите расстояние от экрана до щели  $L$  таким образом, чтобы вы могли наблюдать четкое изображение дифракционной картины (см. рис.3).



Рис.3. Картина дифракции на узкой щели.

3. Измерьте расстояние  $L$  от экрана до щели.

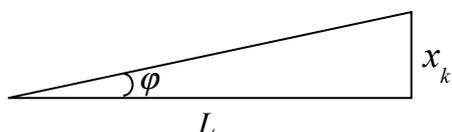


Рис. 4.

4. Перенесите эту картину на бумагу и рассчитайте синус угла, при котором наблюдается минимум интенсивности. При расчетах воспользуй-

тесью следующими соображениями. Поскольку расстояние от щели до экрана  $L$  много больше размеров щели, то угол  $\varphi$  можно считать малым. Для малых углов справедливо соотношение  $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$ . В этом случае (см. рис. 4.),

$$\sin \varphi = \frac{x_k}{L}. \quad (5)$$

Здесь  $x_k$  – расстояние от середины центральной полосы до  $k$ -той темной полосы. С помощью линейки определите расстояния  $x_k$  для трех порядков дифракции.

5. При подстановке выражения (5) в условие наблюдения дифракционных минимумов (2) можно получить выражение для расчета ширины щели  $a$

$$a = \frac{k\lambda L}{x_k}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (6)$$

6. По формуле (6) рассчитайте размер щели, учитывая, что длина волны излучения лазера  $\lambda = 655 \text{ нм}$ .  
 7. Рассчитайте среднее значение ширины щели  $\langle a \rangle$ .  
 8. Заполните таблицу 1.

Таблица 1

№ min	$L$	$x_k, \text{ м}$	$a, \text{ м}$	$\langle a \rangle, \text{ м}$
1				
2				
3				

## Упражнение 2. Определение периода дифракционной решетки

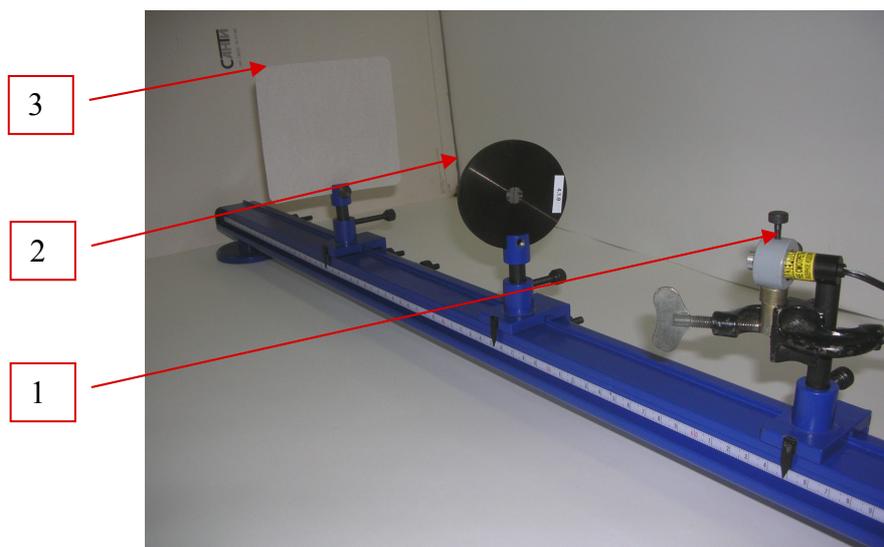


Рис.5. Схема наблюдения дифракционной картины.  
 1 – лазерный излучатель, 2 – оправа с дифракционной решеткой, 3- экран.

1. Внимательно изучите схему для наблюдения дифракционной картины. Установите на оптическую скамью дифракционную решетку 4.1.ДЛ10.
2. Для определения периода дифракционной решетки осветите ее нерасширенным лазерным пучком.
3. Подберите расстояние  $L$  от экрана до дифракционной решетки таким образом, чтобы вы могли наблюдать не менее трех порядков дифракции.
4. Прикрепите к экрану белый лист и перенесите дифракционную картину на бумагу.
5. С помощью линейки измерьте расстояния  $r_k$  между нулевым и  $k$ -тым порядком дифракционных максимумов (см. рис. 6).

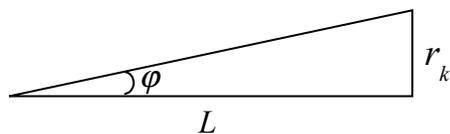


Рис. 6.

6. Измерьте расстояние  $L$  от дифракционной решетки до экрана.
7. Используя известное соотношение для наблюдения дифракционных максимумов

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

и формулу для расчета

$$\sin \varphi = \frac{r_k}{L}, \quad (7)$$

определите период  $d$  решетки по формуле (8)

$$d = \frac{k\lambda L}{r_k}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (8)$$

8. Рассчитайте  $\langle d \rangle$ .
9. По формуле (9) оцените относительную погрешность измерения

$$\varepsilon = \frac{\langle d \rangle - d}{d} \cdot 100\%. \quad (9)$$

10. Заполните таблицу 2.

Таблица 2

№ max	$L$	$r_k, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$\langle d \rangle, \text{ м}$	$\varepsilon, \%$
1					
2					
3					

11. Установите на оптическую скамью дифракционную решетку 4.1.ДЛ20.
12. Прodelайте пункты 2-10.
13. Сформулируйте вывод.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какое явление называется дифракцией?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Запишите условия наблюдения дифракционных максимумов и минимумов при наблюдении дифракции на узкой щели.
4. Объясните, что представляет собой дифракционная решетка?
5. Какая величина называется периодом дифракционной решетки?
6. Запишите условия наблюдения максимумов и минимумов при наблюдении дифракции на дифракционной решетке.
7. Как меняется острота главных максимумов при увеличении числа щелей решетки?