

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Северо-Кавказский филиал  
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»

**ФИЗИКА**  
**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

Учебное пособие  
для лабораторных занятий

Направление подготовки: 10.03.01 «Информационная безопасность»  
Профиль: «Безопасность компьютерных систем»

Ростов-на-Дону  
2022

Учебное пособие  
для лабораторных занятий

по дисциплине

ФИЗИКА

Составители: Б.Б. Конкин — к.ф.-м.н., доцент

Рассмотрено и одобрено  
на заседании кафедры Общенаучной подготовки  
Протокол от «30» августа 2022 г. №1

В пособии описаны лабораторные работы, входящие в рабочую программу дисциплины физики для студентов направления подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность» СКФ МТУСИ. Каждая работа содержит цель, используемое оборудование, краткую теоретическую часть, описание экспериментальной установки, задания, примеры оформления отчетов, и контрольные вопросы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Погрешности физических измерений .....	5
Лабораторная работа № 1. Определение скорости пули.....	10
Лабораторная работа № 2. Изучение законов динамики на маятнике Обербека .....	14
Лабораторная работа № 3. Исследование электростатических полей...	18
Лабораторная работа № 4. Изучение электрических цепей постоянного тока.....	23
Лабораторная работа № 5. Определение горизонтальной составляю- щей напряженности магнитного поля земли.....	27
Лабораторная работа №6. Исследование гармонических колебаний.....	31
Лабораторная работа № 7. Исследование стоячих волн.....	37
Лабораторная работа № 8. Исследование внешнего фотоэффекта.....	42
Литература.....	47
Приложение.....	47

## ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящего пособия — позволить студенту самостоятельно воспроизвести основные физические явления, приучить его к обращению с измерительными приборами и познакомить с важнейшими методами измерений. Лабораторные занятия прививают студентам навыки оценки достоверности полученных результатов, их интерпретации, в том числе, и графической.

Каждый студент выполняет лабораторные работы в соответствии с индивидуальным графиком, сообщаемым ему преподавателем на первом занятии. Все выполняемые студентом лабораторные работы оформляются на двойном тетрадном листе или в тетради для лабораторных работ.

Описания к работам содержат цель работы, используемое оборудование, а начинаются с кратких теоретических сведений. Они составлены так, чтобы ясное представление о существе изучаемых явлений и применяемом методе измерений могли себе составить как те студенты, которые уже прослушали этот материал на лекциях, так и те, которые только приступают к изучению соответствующего раздела физики. Поэтому до прихода в лабораторию студент должен предварительно подготовиться к выполнению работы, познакомившись с ее описанием, записав в тетради ее название, цель, оборудование, основные законы, используемые при выполнении конкретной работы, рабочие формулы, заготовки таблиц.

После теоретических сведений приводится описание экспериментальной установки и измерительной аппаратуры. Затем следуют задания, регламентирующие последовательность работы студентов при проведении измерений. Перед тем как к ним приступить, студенту рекомендуется проделать ряд простых опытов, позволяющих понять особенности исследуемого явления и измерительной аппаратуры, убедиться в ее исправности, оценить надежность результатов. Проведение таких опытов — и их описание в отчете — считается важнейшей составной частью работы студента. Задания составлены таким образом, что дают возможность преподавателю варьировать их подбор в соответствии с успеваемостью и личными наклонностями студентов. Задание под №1 в каждой работе определяет необходимый минимум, без выполнения которого лабораторная работа не будет зачтена. Если у студента остается время, он может проводить дополнительные задания, что следует всячески приветствовать и поощрять.

В конце описаний приводятся списки контрольных вопросов и рекомендуемой литературы.

В основе точных естественных наук, к числу которых относится и физика, лежат измерения. При измерениях значения физических величин выражаются в виде чисел, которые указывают, во сколько раз измеренная величина больше или меньше другой величины, значение которой принято за единицу. Полученные в результате измерений числовые значения различных величин, например, времени, пути, скорости и т. д., могут зависеть друг от друга. Физика устанавливает связь между такими величинами и выражает ее в виде формул, которые показывают, как числовые значения одних величин могут быть найдены по числовым значениям других.

Получение надежных числовых значений физических величин отнюдь не является простой задачей из-за многочисленных погрешностей, неизбежно возникающих при измерениях. Ниже рассматриваются виды измерений, сопровождающие их погрешности, а также простейшие методы, применяемые при обработке результатов измерений.

## ПОГРЕШНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** Познакомиться с видами измерений, изучить методику расчета погрешностей физических измерений и правила оформления результатов эксперимента.

В основе физики лежат экспериментальные исследования, сопровождающиеся измерениями.

Измерить физическую величину — значит сравнить ее с однородной физической величиной, принятой за единицу измерения. Измерения бывают прямыми и косвенными.

**Прямые** измерения производятся с помощью приборов, измеряющих саму исследуемую величину. Так, массу тела можно определить с помощью весов, длину — измерить линейкой, время — секундомером.

**Косвенными** называются измерения, в которых значение измеряемой величины находится путем вычисления по формуле, содержащей данные измерений других физических величин. Так, плотность вещества определяется по результатам измерений массы и размеров тела.

Качество измерений определяется их точностью, зависящей от методики измерений, состояния приборов и ряда случайных факторов, сопровождающих эксперимент. В объеме настоящего пособия будем говорить лишь об оценке погрешностей измерений.

## СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

**Среднее арифметическое значение измеряемой величины** определяется отношением суммы всех  $x_i$  измерений к их числу  $n$ :

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

**ПРИМЕР 1.** Пусть в ходе исследования проведено  $n = 11$  измерений ширины  $l$  некоторого протяженного участка с точностью до 0,1 м. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	среднее
$l$ , м	8,0	7,9	7,8	8,2	8,5	7,8	8,4	8,3	7,8	8,2	8,2	8,1
$\Delta l$ , м	0,1	0,2	0,3	0,1	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3

Среднее значение ширины участка

$$l_{cp} = \frac{1}{11} (8,0 + 7,9 + \dots + 8,2) = 8,1 \text{ м.} \quad (2)$$

## ПОГРЕШНОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Точность измерений характеризуется погрешностями, которые представляются абсолютной и относительной ошибками.

**Абсолютная погрешность**  $\Delta x_i$  отдельного измерения — это модуль разности среднего  $x_{cp}$  и отдельного  $x_i$  значений измеряемой величины

$$\Delta x_i = |x_{cp} - x_i| \quad (3)$$

В нашем случае, например для пятого измерения ширины, получаем

$$\Delta l_5 = |l_{cp} - l_5| = |8,1 - 8,5| = 0,4 \text{ м.} \quad (4)$$

Абсолютные погрешности для всех измерений представлены в таблице 1. Среднее значение абсолютной ошибки (погрешности)

$$\Delta x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (5)$$

Для рассматриваемого примера  $\Delta l_{cp} = 0,218 \text{ м.}$

**ЗАМЕЧАНИЕ 1.** Погрешности измерений всегда округляются в сторону больших значений. Поэтому принимаем  $\Delta l_{cp} = 0,3 \text{ м}$  (см. табл. 1, крайний правый столбец).

**Относительная погрешность**  $\delta x$  — это отношение средней абсолютной погрешности к среднему значению измеряемой величины, умноженное на 100%:

$$\delta x = \frac{\Delta x_{cp}}{x_{cp}} \cdot 100\% \quad (6)$$

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Результаты измерений** должны представляться в конце отчета каждой лабораторной работы с учетом допущенных погрешностей в виде:

$$x = (x_{cp} \pm \Delta x_{cp}), \quad \delta x = \_\_\_\% \quad (7)$$

Для рассматриваемого примера:

$$l = (8,1 \pm 0,3) \text{ м, } \delta l = 4\%. \quad (8)$$

**ЗАМЕЧАНИЕ 2.** Абсолютные ошибки измерений, выполненных в нашей лаборатории, округлять в сторону больших значений и представлять одной значащей цифрой. Среднее значений измеряемой величины округлять до разряда абсолютной ошибки.

## ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Погрешность электроизмерительных приборов определяется их классом точности  $k$ . **Класс точности** равен отношению абсолютной погрешности  $\Delta x$  прибора к пределу измерения  $x_{np}$ , т.е. к максимальному значению величины, которое можно измерить этим прибором. Класс точности указывается на шкале приборов в процентах:

$$k = \frac{\Delta x}{x_{np}} \cdot 100\% . \quad (9)$$

**Абсолютная погрешность прибора** находится из представленного соотношения (9):

$$\Delta x = \frac{k \cdot x_{np}}{100\%} . \quad (10)$$

**ПРИМЕР 2.** Пусть класс точности вольтметра равен 1, а его предел измерения  $x_{np} = 30 \text{ В}$ . Тогда абсолютная погрешность вольтметра

$$\Delta U = \frac{1\% \cdot 30 \text{ В}}{100\%} = 0,3 \text{ В} . \quad (11)$$

Если класс точности прибора не указан, то абсолютная погрешность принимается равной половине цены деления шкалы. Например, при измерении длины линейкой с миллиметровыми делениями погрешность измерения составит 0,5 мм.

**ЗАМЕЧАНИЕ 3.** Погрешность измерения не может быть меньше погрешности измерительного прибора.

## ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пусть функциональная зависимость косвенно измеряемой величины  $y$  от непосредственно измеряемых величин  $x_i$  имеет вид:

$$y = ax_1 \frac{bx_2^3}{cx_3^2} , \quad (12)$$

где  $a, b, c$  — константы. Среднее значение  $y_{cp}$  вычисляется по средним значениям  $x_1, x_2, x_3$ .

Для определения формулы относительной погрешности косвенно измеряемой величины  $y$  сначала логарифмируют представленное соотношение:

$$\ln y = \ln a + \ln x_1 + \ln b + 3 \ln x_2 - \ln c - 2 \ln x_3 . \quad (13)$$

Затем дифференцируют полученное равенство и, заменяя знаки минус на плюс и знаки дифференциала  $d$  на знаки конечного приращения  $\Delta$ , получают выражение относительной погрешности:

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y_{cp}} = \frac{\Delta x_1}{x_1} + 3 \frac{\Delta x_2}{x_2} + 2 \frac{\Delta x_3}{x_3} . \quad (14)$$

Здесь  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  — абсолютные погрешности и  $x_1, x_2, x_3$  — средние значения величин прямых измерений.

Зная относительную погрешность  $\delta y$  и среднее значение  $y_{cp}$ , вычисляют абсолютную погрешность:

$$\Delta y = \delta y \cdot y_{cp} . \quad (15)$$

Окончательный результат записывают в виде:

$$y = (y_{cp} \pm \Delta y); \quad \delta y = \frac{\Delta y}{y_{cp}} \cdot 100\% \quad (16)$$

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Задание 1. Определить погрешности прямых измерений

Таблица 2. Сила тока

№	$I, A$	$I_{cp}, A$	$\Delta I, A$	$\Delta I_{cp}, A$
1.	2,1			
2.	1,8			
3.	1,9			
4.	2,0			
5.	2,3			

Таблица 3. Время

№	$t, c$	$t_{cp}, c$	$\Delta t, c$	$\Delta t_{cp}, c$
1.	6,9			
2.	7,1			
3.	7,0			
4.	7,1			
5.	7,0			

Таблица 4. Расстояние

№	$l, m$	$l_{cp}, m$	$\Delta l, m$	$\Delta l_{cp}, m$
1.	3,8			
2.	3,5			
3.	4,0			
4.	4,4			
5.	4,3			

1. Определить по формуле (1) среднее значение физической величины, указанной (табл. 2 – 4) преподавателем.
2. Найти абсолютные погрешности измерений по формуле (3).
3. Вычислить среднее значение абсолютной погрешности, используя выражение (5).
4. Рассчитать относительную погрешность измерения по формуле (6).
5. Представить результат измерений в виде (7).

### Задание 2. Определить показания и погрешности измерительных приборов



Рис. 1. Вольтметр  
класс точности 1,0



Рис. 2. Мегаваттметр  
класс точности 1,5



Рис. 3. Амперметр  
класс точности 2,0

1. Определить предел измерения прибора (рис. 1 – 3), указанного преподавателем.
2. Вычислить по формуле (10) абсолютную погрешность указанного прибора, учитывая заданный (рис. 1 – 3) класс точности.
3. Определить показания прибора, полагая, что стрелка отклонилась правее отметки 40 (рис. 1); 1,5 (рис. 2); 80 (рис. 3) на два деления.
4. Рассчитать относительную погрешность измерения по формуле (6).
5. Представить результат измерения в виде (7).



### ***Задание 3. Определить погрешности косвенных измерений***

1. Получить от преподавателя одно из соотношений (а, б, в):

$$y = ax_1^2 \frac{bx_2^3}{cx_3} \text{ (а);} \quad y = ax_1^3 \frac{bx_2^2}{cx_3} \text{ (б);} \quad y = ax_1^3 \frac{cx_3^2}{bx_2} \text{ (в).}$$

2. Положить, что константы  $a, b, c$ , средние значения измеряемых величин  $x_1, x_2, x_3$  и абсолютная погрешность  $\Delta x$  соответственно равны:  $a = 2$ ;  $b = 3$ ;  $c = 4$ ;  $x_1 = 1,0$ ;  $x_2 = 2,0$ ;  $x_3 = 3,0$  и  $\Delta x_i = 0,1$ .
3. Вычислить среднее значение измеряемой величины, используя заданное соотношение.
4. Вычислить, согласно алгоритмам (13) – (15), относительную и абсолютную погрешности косвенно измеряемой величины.
5. Представить результат измерения в виде (16).

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие измерения называются прямыми, а какие косвенными? Привести примеры.
2. Как найти среднее арифметическое измерений  $x_1, x_2, x_3, x_4$ .
3. Как находятся абсолютные и относительные погрешности прямых измерений?
4. Как записывается окончательный результат прямых измерений?
5. Что такое класс точности прибора?
6. Как определяется абсолютная погрешность прибора по известному классу точности.
7. Как определяется абсолютная погрешность однократных измерений, при неизвестном классе точности прибора?
8. Указать последовательность операций нахождения погрешностей косвенных измерений

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ

**Цель работы:** На основе законов сохранения определить скорость пули, жесткость пружины, потери механической энергии.

**Оборудование:** Модульный учебный комплекс МУК-М1, включающий пружинный пистолет, набор пуль, баллистический маятник, линейку с миллиметровой шкалой.

## ВВЕДЕНИЕ

Баллистический маятник — это массивный цилиндр массой  $M$ , подвешенный на невесомых нитях (рис. 1), способный двигаться только поступательно. Вблизи маятника закреплен пружинный пистолет  $P$ , стреляющий пулями массой  $m$ . При попадании пули в торец цилиндра, заполненного пластилином, происходит абсолютно неупругий удар, после которого тела движутся как единое целое. При этом выполняется только закон сохранения импульса. Закон сохранения механической энергии не выполняется, поскольку кинетическая энергия пули частично переходит во внутреннюю энергию.

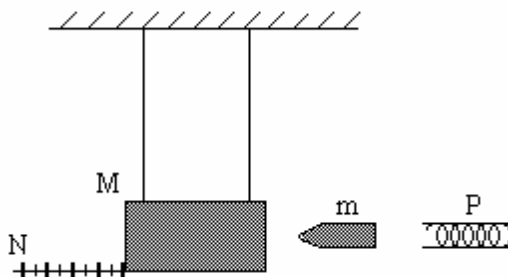


Рис. 1

Считая маятник-пуля замкнутой системой, применим закон сохранения импульса:

$$mv = (m + M)u, \quad (1)$$

где  $v$  - скорость пули до удара,  $u$  - скорость маятника с пулей сразу после удара.

При скорости  $u$  маятник обладает максимальной кинетической энергией. По мере отклонения от положения равновесия маятник поднимается относительно первоначального положения, а его кинетическая энергия переходит в потенциальную. Согласно закону сохранения механической энергии

$$\frac{(m + M)u^2}{2} = (m + M)gh, \quad (2)$$

где  $h$  – наибольшая высота, на которую поднимется маятник,  $g$  – ускорение свободного падения. Слева от знака равенства представлена кинетическая энергия поступательного движения маятника сразу после попадания пули (в этой точке потенциальную энергию принимаем равной нулю), а справа – потенциальная энергия системы в момент ее остановки на максимальной высоте  $h$ .

Решая совместно уравнения (1) и (2), выразим скорость пули:

$$v = \frac{m+M}{m} \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

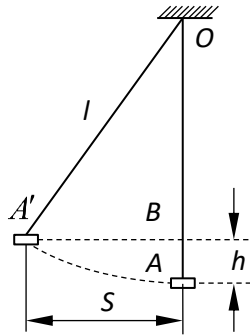


Рис. 2

Таким образом, скорость полета пули можно вычислить, зная высоту  $h$  подъема маятника, которую выразим через соответствующее горизонтальное смещение (рис. 2) маятника  $S$ . Из прямоугольного треугольника  $OA'B$  следует

$$l^2 = S^2 + (l-h)^2. \quad (4)$$

Здесь где  $l$  – длина нити маятника. Раскрывая скобки и, пренебрегая слагаемым  $h^2$ , получаем  $S^2 = 2lh$ . Отсюда следует:

$$h = \frac{S^2}{2l}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим рабочую формулу для определения скорости пули:

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

Здесь:  $m$  – масса пули;  $M$  – масса,  $l$  – длина нити и  $S$  – горизонтальное смещение баллистического маятника;  $g$  – ускорение свободного падения.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Задание 1. Определить скорости пуль различной массы

1. Запишите массу  $M$ , длину нити  $l$  баллистического маятника и массы  $m_i$  пуль, указанные на подставке модуля.

$$M = \text{____ кг}, \quad l = \text{____ м}.$$

Таблица 1.

№	$m, \cdot 10^{-3}$ кг	$S_H, \cdot 10^{-3}$ м	$S_K, \cdot 10^{-3}$ м	$S = S_K - S_H,$ $\cdot 10^{-3}$ м	$v$ , м/с	$k$ , Н/м	$\Delta k$ , Н/м	$Q$ , Дж	$Q/E_k$ , %
1.									
2.									
3.									

2. Зарядите пружинный пистолет пулей с наибольшей массой.

3. Подготовьте устройство N (см. рис.1) к измерению горизонтального смещения  $S$  маятника.
4. Запишите в таблицу 1 численное значение начальной координаты  $S_{нач}$  маятника по линейке отсчетного устройства N.
5. Осуществите первый выстрел, нажав пусковой рычаг пружинного пистолета.
6. Запишите численное значение конечной координаты  $S_{кон}$ , определив его по линейке отсчетного устройства N.
7. Вычислите смещение маятника при опыте:

$$S = S_{кон} - S_{нач}. \quad (7)$$

8. По формуле (6) определите скорость пули и занесите результат в таблицу.
9. Согласно пунктам 2 – 8 определите скорость остальных пуль.
10. Для пули с наименьшей массой вычислите относительную погрешность скорости по формуле:

$$\delta v = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (8)$$

где:  $\Delta M$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta m$  — абсолютные погрешности массы и длины нити баллистического маятника, массы пули соответственно — взять из данных на стенде;  $\Delta S = 10^{-3}$  м — абсолютная погрешность смещения маятника.

11. Вычислите абсолютную погрешность скорости для всех пуль по формуле:

$$\Delta v = \delta v \cdot v_{cp}. \quad (9)$$

12. Представьте скорость всех пуль в виде:

$$v = (v_{cp} \pm \Delta v) \text{ м/с}. \quad (10)$$

### ***Задание 2. Определить коэффициент жесткости пружины пистолета***

Полагая, что потенциальная энергия пружинного пистолета при выстреле полностью переходит в кинетическую энергию пули, запишем закон сохранения механической энергии

$$\frac{kx^2}{2} = \frac{mv^2}{2}, \quad (11)$$

где  $x$  — сжатие пружины;  $m$  — масса и  $v$  — скорость пули. Отсюда выразим жесткость  $k$  пружины

$$k = \frac{mv^2}{x^2}. \quad (12)$$

1. Рассчитать жесткость пружины по формуле (12), используя данные массы  $m$  и скорости  $v$  для каждой пули. Сжатие  $x$  пружины принять равному длине части пули, входящей в ствол пистолета,  $x = (25 \pm 1) \cdot 10^{-3}$  м. Результаты свести в таблицу 1.
2. Вычислить среднее значение жесткости пружины

$$k_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i. \quad (13)$$

3. Найти абсолютные погрешности жесткости пружины и их среднее значение:

$$\Delta k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |k_{cp} - k_i|. \quad (14)$$

4. Представить жесткость пружины в виде, аналогичном (10).

### ***Задание 3. Определить потери механической энергии при неупругом ударе***

При неупругом взаимодействии пули с баллистическим маятником часть кинетической энергии пули за счет работы сил трения переходит во внутреннюю энергию, тела нагреваются. Количество теплоты  $Q$ , выделившееся при абсолютно неупругом ударе определяется разностью кинетических энергий до и после взаимодействия:

$$Q = \frac{mv^2}{2} - \frac{(m+M)u^2}{2}, \quad (14)$$

где  $m$  – масса и  $v$  – скорость пули до удара;  $M$  – масса баллистического маятника. Скорость  $u$  маятника после удара найдем из закона сохранения импульса (1)

$$u = \frac{m}{m+M} v. \quad (15)$$

Тогда

$$Q = \left(1 - \frac{m}{m+M}\right) \cdot \frac{mv^2}{2} = \frac{M}{m+M} \cdot \frac{mv^2}{2}. \quad (16)$$

Доля выделившегося количества теплоты  $Q$  в кинетической энергии  $E_k$  пули составляет:

$$\frac{Q}{E_k} = \frac{M}{m+M} \cdot 100\%. \quad (17)$$

1. Рассчитать по формуле (16) потери механической энергии при неупругом ударе для всех пуль, использовавшихся в эксперименте. Результаты свести в таблицу 1.
2. Рассчитать по формуле (17) долю выделившегося количества теплоты  $Q$  в кинетической энергии  $E_k$  пули и записать в процентах в таблицу 1.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дать определение импульса тела.
2. Сформулировать закон сохранения импульса.
3. Записать формулы кинетической и потенциальной энергии тела.
4. Сформулировать закон сохранения механической энергии.
5. Дать определение упругого и абсолютно неупругого ударов.
6. Какие из законов сохранения выполняются при упругом ударе?

7. Какие из законов сохранения выполняются при абсолютно неупругом ударе?
8. Записать формулу потенциальной энергии деформированной пружины.
9. За счет чего происходят потери механической энергии при неупругом ударе?
10. Какой массе пули соответствуют наибольшие потери механической энергии и почему?

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ НА МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА

**Цель работы:** На основе законов динамики определить момент инерции маятника Обербека, исследовать зависимость момента инерции «материальной точки» от расстояния до оси вращения.

**Оборудование:** Модульный учебный комплекс МУК-М1, включающий маятник Обербека, секундомер, линейку с миллиметровой шкалой, набор грузов.

#### ВВЕДЕНИЕ

Маятник Обербека состоит (рис. 1) из четырех стержней, ввинчивающихся в барабан под прямым углом друг к другу. На стержни можно надевать грузики массой  $m_0$  и устанавливать их на различных расстояниях от оси вращения  $O$ . Барабан имеет два шкива, на которые поочередно наматывается нить с грузом (рис. 1) массой  $m$  на конце. Под действием груза нить разматывается, приводя маятник в равноускоренное вращение.

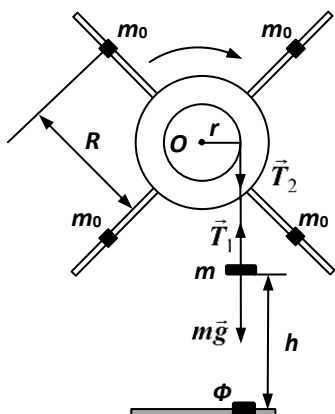


Рис. 1. Схема маятника

При этом на груз  $m$  (рис.1) действуют две силы: сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила натяжения нити  $\vec{T}$ . Результирующая этих сил сообщает грузу ускорение  $\vec{a}$ . В проекциях на направление движения второй закон Ньютона  $F = ma$  принимает вид:

$$mg - T_1 = ma \Rightarrow T_1 = T = m(g - a). \quad (1)$$

Здесь учтено, что  $T_1 = T_2 = T$ , так как сила натяжения  $\vec{T}_1$  передается нитью от груза (рис. 1) к шкиву, и согласно третьему закону Ньютона  $\vec{T}_2 = -\vec{T}_1$ , а модули этих сил равны.

Сила  $\vec{T}_2$ , действующая на шкив (рис.1), создает вращающий момент

$$M = T \cdot r, \quad (2)$$

где  $r$  — радиус шкива (рис.1). Под действием вращающего момента маятник Обербека приобретает угловое ускорение  $\beta$ . По основному закону динамики вращательного движения:

$$M = I\beta. \quad (3)$$

Здесь  $I$  — момент инерции маятника относительно оси  $O$  вращения, являющийся мерой инертности тела при вращении (аналог массы тела при поступательном движении).

Момент инерции зависит не только от массы тела, но и от ее распределения относительно оси вращения. Например, для материальной точки массой  $m_0$ , вращающейся по окружности радиуса  $R$ , момент инерции  $I = m_0 \cdot R^2$ .

Момент инерции маятника Обербека найдем из совместного решения уравнений (2) и (3) с учетом соотношения (1) для натяжения нити  $T$  и связи углового ускорения с тангенциальным  $\beta = a/r$ :

$$I = mr^2 \left( \frac{g}{a} - 1 \right). \quad (4)$$

Ускорение  $a$  выразим из формулы пути для равноускоренного движения без начальной скорости

$$h = \frac{at^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2h}{t^2}, \quad (5)$$

где  $h$  — расстояние, пройденное грузом (рис.1) за время  $t$ .

Тогда рабочая формула для вычисления момента инерции маятника Обербека принимает окончательный вид:

$$I = mr^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (6)$$

Здесь  $m$  — масса (рис.1) груза,  $r$  — радиус шкива,  $g$  — ускорение свободного падения,  $t$  — время, за которое груз опустится с высоты  $h$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Задание 1. Определить момент инерции маятника Обербека

1. Снять грузики (рис.1) массой  $m_0$  со стержней.
2. Записать радиусы малого и большого шкивов, указанные на подставке модуля МУК-М1, в таблицу 1.
3. Записать, заданное преподавателем значение массы  $m$  груза и высоту  $h$ .

$$m = \text{_____ кг}, \quad h = \text{_____ м}.$$

Таблица 1

№	$r, \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_{cp}, \text{ с}$	$I, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$I_{cp}, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$\Delta I, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$\Delta I_{cp}, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
1.									
2.									

4. Включить электронный секундомер и установить режим №1 с работающим тормозным устройством.
5. Установить заданную высоту  $h$  груза. Для этого отключить тормозное устройство барабана, удерживая в нажатом положении кнопку на подставке МУК. Вращая рукой маятник против часовой стрелки, намотать нить на малый шкив. Отпустить кнопку.
6. Определить время  $t$  прохождения грузом высоты  $h$ , нажав кнопку «Пуск» секундомера. В момент достижения грузом нижней точки секундомер остановится по сигналу фотодат-

чика  $\Phi$  (рис. 1) и сработает тормозное устройство. Показания секундомера внести в таблицу 1. Опыт проделать три раза.

7. Рассчитать момент инерции маятника Обербека по формуле (6), используя среднее значение времени, и занести результат в таблицу 1.

8. Прodelать п.п. 4 – 6, наматывая нить на большой шкив.

9. Вычислить среднее значение момента инерции

$$I_{cp} = \frac{I_1 + I_2}{2}. \quad (7)$$

10. Вычислить абсолютную погрешность момента инерции маятника для каждого измерения:

$$\Delta I_i = |I_{cp} - I_i| \quad (8)$$

и найти среднюю абсолютную погрешность  $\Delta I$  аналогично (7).

11. Вычислить относительную погрешность момента инерции маятника по формуле:

$$\delta I = \frac{\Delta I}{I_{cp}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

12. Представить момент инерции маятника в виде:

$$I = (I_{cp} \pm \Delta I) \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad \delta I = \_\_\_\% . \quad (10)$$

**Задание 2. Определить зависимость момента инерции груза от расстояния до оси вращения.**

1. Записать радиус  $r$  малого шкива, массу  $m_0$  закрепляемого на каждый стержень груза, массу  $m$  груза, подвешенного к нити (рис.1) и высоту  $h$ .

$$r = \_\_\_\text{ м}, \quad m_0 = \_\_\_\text{ кг}, \quad m = \_\_\_\text{ кг}, \quad h = \_\_\_\text{ м}.$$

Таблица 2

№	$R, \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$R^2, \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_{cp}, \text{ с}$	$I, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$I_{\text{эксп}}, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$I_{\text{теор}}, \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									

2. Закрепить по одному грузу массой  $m_0$  на первой от оси вращения риски каждого стержня.

3. Расстояние  $R$  (рис.1) от оси вращения до центра груза  $m_0$  определить при помощи нанесенных на стержни делений (риски), указанного на подставке модуля МУК-М1 диамет-



ра цилиндра, в который вкручиваются стержни и диаметра самого грузика  $m_0$ . Значение  $R$  внести в таблицу 2.

4. Установить заданную высоту  $h$  груза.

5. Определить время  $t$  опускания груза и записать его в таблицу 2. Опыт проделать три раза.

6. Рассчитать момент инерции по формуле (6), используя среднее значение времени, и занести результат в таблицу 2.

7. Перемещая грузики  $m_0$  вдоль стержней на два деления, выполнять пп. 3-6 (всего для пяти значений  $R$ ).

8. Вычислить экспериментально определенный момент инерции одного грузика

$$I_{\text{эксп}} = \frac{I_i - I}{4}, \quad (11)$$

где  $I_i$  – момент инерции маятника с грузиками для каждого расстояния  $R$ ;  $I$  – момент инерции маятника без грузиков из задания 1.

9. Построить график зависимости момента инерции  $I_{\text{эксп}}$  грузика от квадрата расстояния  $R$  до оси вращения.

10. Используя значения абсолютной погрешности  $\Delta I$  (8), показать на графике интервалы, в которых лежат истинные значения  $I_{\text{эксп}}$ .

### **Задание 3. Рассчитать момент инерции материальной точки**

Известно, что момент инерции материальной точки массой  $m_0$ , вращающейся по окружности радиуса  $R$ , определяется по формуле:

$$I_{\text{теор}} = m_0 R^2. \quad (12)$$

1. Вычислить момент инерции материальной точки по формуле (12) для трех значений  $R$ , соизмеримых с длиной стержней, полагая, что  $m_0$  – масса грузика на стержне. Данные занести в таблицу 2.

2. Построить теоретически ожидаемую зависимость момента инерции маятника материальной точки от  $R^2$  на том же рисунке, что и график экспериментально полученной зависимости для одного грузика. (См. п. 9 задания 2).

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие силы действуют на опускающийся груз массой  $m$ ?
2. Дать формулировку и записать формулу второго закона Ньютона.
3. Дать определение момента силы.
4. Что понимается под плечом силы?
5. Указать момент силы, обеспечивающий вращение маятника Обербека.
6. В чем состоит физический смысл момента инерции тела? От каких величин он зависит?
7. Что понимается под моментом инерции материальной точки?
8. Сформулировать основной закон динамики вращательного движения.
9. Указать связь углового и тангенциального ускорения обода шкива.
10. Вывести расчетную формулу (6) момента инерции.

11. Зависит ли момент инерции маятника Обербека от радиуса шкива, на который наматывается нить, и массы подвешенного груза?

### Лабораторная работа № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

**Цель работы:** Изобразить электростатическое поле при помощи силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Определить напряженность поля в заданной точке поля и его направление.

**Оборудование:** Электролитическая ванна, вольтметр, набор электродов.

### ВВЕДЕНИЕ

Всякий неподвижный заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле, представляющее собой особую форму существования материи. Одно из основных свойств электрического поля заключается в том, что на заряд, помещенный в любую точку поля, действует сила  $\vec{F}$ . Силовой характеристикой электрического поля является напряженность  $\vec{E}$ .

Напряженность поля в данной точке – векторная величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \vec{F}/q, \quad (10.1)$$

Где  $\vec{F}$  – сила, с которой поле в данной точке действует на точечный заряд  $q$ .

Напряженность электрического поля, образуемого системой зарядов, зависит от:

1. величины зарядов, создающих поле;
2. пространственного расположения этих зарядов;
3. координат точки наблюдения в электрическом поле;
4. среды, в которой создано электрическое поле.

В простейшем случае поля точечного заряда вектор напряженности определяется выражением

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (10.2)$$

Где:  $q$  – величина заряда, который создает поле;

$\vec{r}$  – радиус — вектор, направленный из точки нахождения заряда в точку наблюдения;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная в системе СИ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Графически электрическое поле может быть изображено в виде совокупности силовых линий. Линия, в каждой точке которой вектор напряженности направлен по касательной, проведенной в этой точке, называется силовой линией. Направление силовой линии в каждой точке электрического поля совпадает с направлением вектора напряженности в этой точке. Силовые линии электрического поля являются незамкнутыми кривыми,

причем густота их в окрестности любой точки поля характеризует значение напряженности электрического поля в этой точке.

Энергетической характеристикой электрического поля является потенциал  $\varphi$ . Потенциалом электрического поля в данной точке называется физическая величина, равная потенциальной энергии единичного положительного точечного заряда, помещенного в эту точку поля:

$$\varphi = \Pi/q, \quad (10.3)$$

где:  $\Pi$  — потенциальная энергия заряда  $q$ .

Потенциал электрического поля в общем случае произвольного распределения зарядов, создающих поле, зависит от величины заряда, его конфигурации, координат точки наблюдения и электрических свойств среды. В частности потенциал поля точечного заряда находится из выражения

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (10.4)$$

В любом электростатическом поле можно выделить совокупность точек, в которых значение потенциала одинаково, т. е.  $\varphi = \text{const}$ . Геометрическое место точек в которых потенциал один и тот же, называется эквипотенциальной поверхностью, так как работа по перемещению заряда  $A = -\Delta\Pi$ , то работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности равна нулю.

Рассмотрим взаимное расположение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей (рис.10.1): PQ — эквипотенциальная поверхность, KL — силовая линия. Работа по перемещению заряда  $q$  вдоль эквипотенциальной поверхности на расстояние  $dl$  равна нулю, но

$$dA = \vec{F}d\vec{l} = qEdl \cos(\widehat{\vec{F} d\vec{l}}) = 0$$

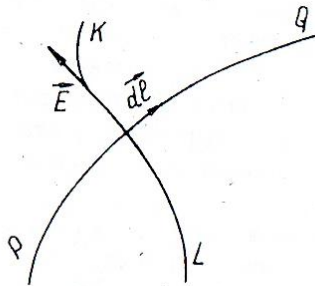


Рис. 10.1

Отсюда угол  $(\widehat{\vec{E} d\vec{l}}) = \pi/2$ , т.е. силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Электрическое поле, таким образом можно изображать не только картиной силовых линий, но и совокупностью эквипотенциальных поверхностей. Оба эти изображения взаимно связаны. В каждом поле выбирают из бесконечного множества эквипотенциальных поверхностей

такие где разность потенциалов между двумя соседними поверхностями одинакова. На рис. 10.2 приводится в качестве примера плоское сечение эквипотенциальных поверхностей поля точечного заряда

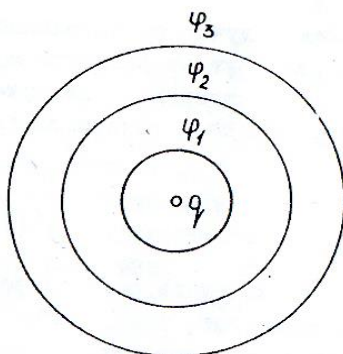


Рис. 10.2

$$(\varphi_1 - \varphi_2 \neq \varphi_2 - \varphi_3)$$

Между силовой и энергетической характеристиками электростатического поля существует связь

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (10.5)$$

Градиентом потенциала  $\text{grad } \varphi$  называется векторная величина, равная производной потенциала по направлению вдоль нормали к эквипотенциальной поверхности:

$$\text{grad } \varphi = \frac{d\varphi}{dr} \vec{n}, \quad (10.6)$$

где: -  $\vec{n}$  единичный вектор нормали эквипотенциальной поверхности. Знак минус в формуле (10.5) указывает на то, что вектор напряженности направлен в сторону наиболее быстрого убывания потенциала.

Целью настоящей работы является исследование электрических полей, создаваемых зарядами, распределенными на телах различных конфигураций при различном их расположении друг относительно друга. Подобная задача встает при конструировании электронных ламп, конденсаторов, систем фокусировки электронных пучков и т. д., когда необходимо знать значение основных характеристик электрического поля в пространстве между электродами сложной формы.

Аналогичный расчет полей удастся только для самых простых конфигураций электродов и в общем случае не выполним, поэтому сложные электрические поля исследуются экспериментально. Для их изучения применяется метод моделирования электростатического поля в электролитической ванне.

Распределение потенциала в среде, по которой течет ток, можно сделать мало отличающимся от распределения потенциала в электростатическом поле; измерения же потенциала в проводящей среде - несложная экспериментальная задача.

Как известно, в проводящей среде при прохождении по ней тока нет объемных электрических зарядов, благодаря чему наблюдается полная идентичность электростатического поля и электрического при наличии токов в однородном проводнике. Это позволяет заменить изучение электростатического поля, создаваемого системой заряженных тел, изучением электростатического поля при наличии тока в слабопроводящих электролитах. При подаче на электроды постоянного напряжения возникают электролизные явления, которые способны внести значительные искажения в картину поля, поэтому при испытаниях на лабораторных установках используют переменное напряжение.

Метод моделирования осуществляют следующим образом:

- а) при помощи системы электродов определенной формы, которые в некотором масштабе воспроизводят расположение электродов в реальном случае, создают электрическое поле;
- в) на электроды подают напряжение. При этом между электродами образуется электрическое поле, отличающееся от поля в реальном случае по числовым характеристикам, но с точностью до масштаба совпадают с ним по конфигурации;
- в) в пространство между электродами вводят зонд — тонкую металлическую проволочку, связанную проводником с прибором, измеряющим потенциал в данной точке поля.

### Описание установки и метод измерений

В ванну, изготовленную из материала с хорошими электроизоляционными свойствами, помещают металлические электроды, между которыми исследуют поле. Ванна заполнена жидким электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла. На электроды подают напряжение  $U$  с клемм понижающего трансформатора.

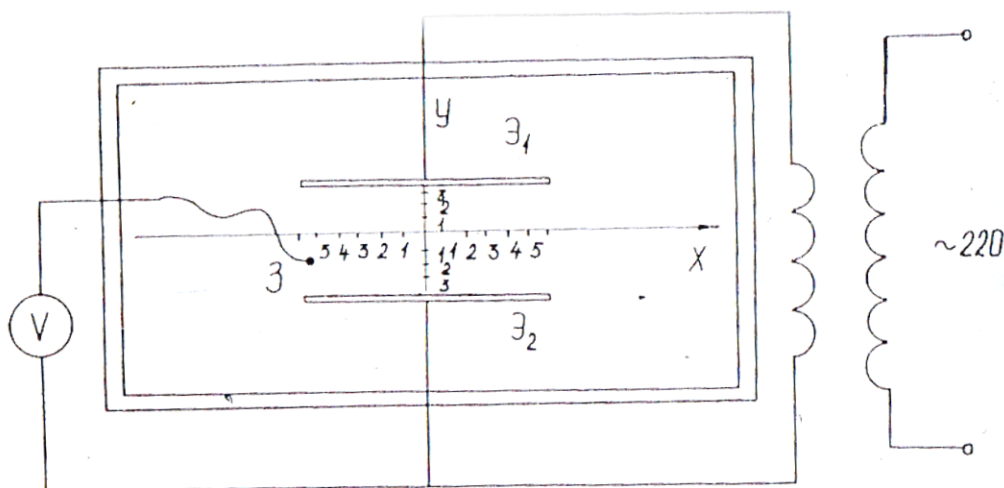


Рис. 10.3

С помощью внесенного в произвольную точку исследуемого поля зонда  $З$  определяют значение разности потенциалов между  $Э_2$  и выбранной точкой поля  $A_i$  (рис. 10.3), затем, перемещая зонд, отыскивают совокупность точек поля с одинаковым потенциалом. Совокупность точек  $A_i$  ( $i=1,2,8$ ) лежит на одной эквипотенциальной поверхности. Считая  $\varphi_{Э_2}=0$  показания вольтметра принимаем за значения потенциала исследуемой поверхности.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание 1.

1. Установить в электролитической ванне систему электродов, имитирующих точечные заряды так, чтобы они находились друг от друга на расстоянии 10...15 см по оси  $Y$ , симметрично оси  $X$ .
2. Включить установку. Прогреть вольтметр, выбрать предел измерения вольтметра, чтобы измерения потенциала можно было вести во второй половине шкалы.

3. Найти геометрическое место точек одинакового потенциала для значений потенциала  $\varphi_i = 0, 1; 3; 5; 7; 9; B$ .

Построить семейство эквипотенциальных поверхностей

$$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1B, \dots, \varphi_6 = 9B.$$

По полученным эквипотенциальным поверхностям построить примерное распределение силовых линий поля.

4. Провести исследование как в п. 3 для полей:

- а) поле системы: точечный заряд - проводящая плоскость;
- б) поле плоского конденсатора.

#### Задание 2.

1. Установить в зажимах ванны систему электродов, имитирующих поле цилиндрического конденсатора.
2. Снять зависимость потенциала  $\varphi$  от расстояния  $r$  от оси электродов в точках  $r_i = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10$  см

### 3. Результаты измерений занести в табл. 10.1

Таблица 10.1.

г, см	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\ln(r)$									
$\varphi$ , В									

#### 4. Построить график зависимостей

$$\varphi = \varphi(r), \quad \varphi = \varphi(\ln r)$$

5. Вывести теоретическую зависимость потенциала от расстояния для поля цилиндрического конденсатора. Для вывода воспользоваться теоремой Гаусса и связью напряженностей и потенциалов.

6. Сравнить вид экспериментальных и расчетных зависимостей  $\varphi(r)$ ;  $\varphi(\ln r)$ . Сделать вывод.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятия. «Электростатическое поле».
2. Укажите основные характеристики электростатического поля.
3. Напишите выражение для нахождения напряженности и потенциала поля точечного заряда
4. Что называется силовой линией электростатического поля.
5. Могут ли пересекаться силовые линии электростатического поля?
6. Сформулируйте теорему Гаусса в электростатике.
7. Как использовать теорему Гаусса для расчета полей:
  - а) плоского конденсатора,
  - б) цилиндрического конденсатора?
8. Какое поле называется однородным полем?
9. Как, зная зависимость  $\varphi(r)$ , найти функцию  $E(r)$ ?
10. Как, зная функцию  $E(r)$  найти зависимость  $\varphi(r)$ .
11. Докажите, что силовые линии электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.
12. Объяснить необходимость применения в схеме измерений высокоомного вольтметра.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. гл. 1.
- 2 Зисман Г.А. Тодес О.М. Курс общей физики. Т.2. 1-3, 5-8.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** Овладеть методами измерения электрических величин с помощью амперметра, вольтметра, осциллографа.

**Оборудование:** Источник тока, набор сопротивлений, мост постоянного тока, генератор постоянного напряжения, осциллограф.

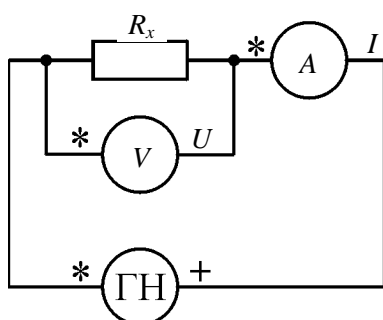
### ВВЕДЕНИЕ

#### Измерение неизвестного сопротивления с помощью вольтметра и амперметра

Экспериментально установлена зависимость силы тока  $I$ , текущего по металлическому проводнику, от напряжения  $U$  на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R} \quad - \text{закон Ома для участка цепи,}$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника.



Используя рабочую формулу  $R = \frac{U}{I}$ , можно определить величину сопротивления  $R$  для нескольких значений напряжения  $U$  на концах проводника.

Измерения  $U$  и  $I$  проводятся с помощью вольтметра и амперметра по схеме рис. 12.1. Для достоверного определения  $R_x$  необходимо, чтобы сопротивление вольтметра  $R_V \gg R_x$ .

Измерения  $R_x$  проводятся при различных значениях напряжения  $U$  генератора напряжения, что позволяет определить  $R_x$  для нескольких измерений и рассчитать величину погрешности.

#### Измерение неизвестного сопротивления при помощи моста постоянного тока

Рассмотрим схему моста постоянного тока, представленную на рис. 12.2. Здесь  $R_x$  – неизвестное сопротивление;  $R_1$  – переменное сопротивление;  $R_2$  и  $R_3$  – известные сопротивления. Во входную диагональ моста ( $ab$ ) включается источник постоянного напряжения (ГН), а в выходную ( $cd$ ) – индикатор равновесия (вольтметр, осциллограф или миллиамперметр с большим внутренним сопротивлением). Если разность потенциалов между точками  $c$  и  $d$   $\varphi_c - \varphi_d$  равна нулю, то мост находится в равновесии. Следовательно, если мост находится в равновесии, измерительный прибор, подключенный к точкам  $c$  и  $d$ , будет показывать «ноль». Установление состояния равновесия моста обеспечивается изменением переменного сопротивления  $R_1$ .

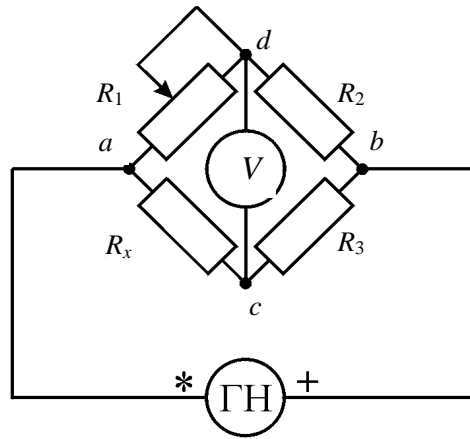


Рис. 12.2

Для того чтобы мост находился в равновесии, необходимо выполнить следующие соотношения:

$$U_{ac} = U_{ad} , \quad (12.1)$$

$$U_{cb} = U_{db} . \quad (12.2)$$

При равновесии моста ток течет только на участке моста  $acb$  (обозначим его  $I_x$ ), и на участке  $adb$  (обозначим его  $I_1$ ).

Запишем закон Ома для каждого сопротивления:

$$U_{ac} = I_x R_x ; \quad (12.3)$$

$$U_{ad} = I_1 R_1 ; \quad (12.4)$$

$$U_{cb} = I_x R_3 ; \quad (12.5)$$

$$U_{db} = I_1 R_2 . \quad (12.6)$$

Процесс измерения состоит в том, что при установленном отношении плеч моста  $R_3/R_2$  добиваются равновесия моста, изменяя переменное сопротивление  $R_1$ .

Формулу для измеряемого сопротивления  $R_x$  получим из (12.3)–(12.6), используя (12.1), (12.2),

$$I_x R_x = I_1 R_1 , \quad (12.7)$$

$$I_x R_3 = I_1 R_2 . \quad (12.8)$$

Разделив (12.7) на (12.8), получим для измеряемого сопротивления

$$R_x = \frac{R_3}{R_2} R_1 . \quad (12.9)$$



## Измерение параметров сигнала с помощью осциллографа

Осциллограф позволяет проводить измерение параметров как постоянных, так и изменяющихся со временем электрических сигналов. Для этого напряжение с генератора  $U_x$  подается на один из каналов осциллографа, как показано на рис. 12.3–12.5.

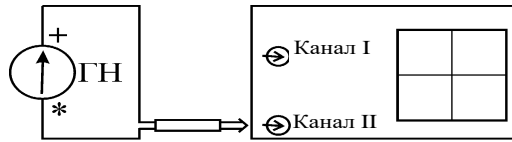


Рис. 12.3

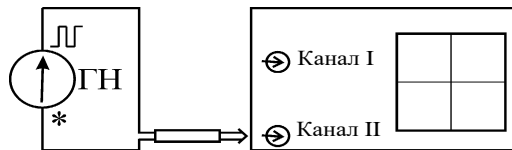


Рис. 12.4

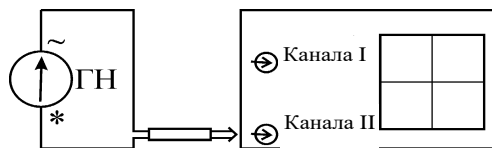


Рис. 12.5

Подобрав соответствующее положение переключателей, на экране осциллографа получим осциллограмму, удобную для наблюдения (см. Приложение). Определив цену деления  $j_x$  по оси  $x$ , вычислим длительность временных интервалов изучаемой осциллограммы по формуле

$$\Delta t = n j_x,$$

где  $n$  – число делений по оси  $x$  на экране осциллографа, на которые укладывается изучаемая часть сигнала.

Таким же образом, определив цену деления  $j_y$  по оси  $y$ , найдем величину напряжения подаваемого электрического сигнала.

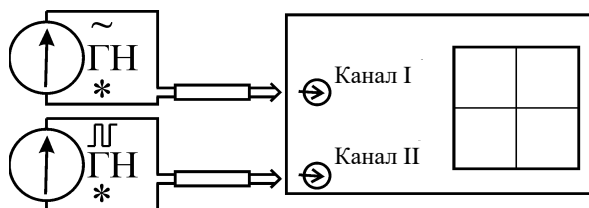


Рис. 12.6

Некоторые модели осциллографов позволяют не только наблюдать одновременно два сигнала на экране, но и осуществлять сложение этих сигналов, как одинаково направленных, так и как взаимно перпендикулярных. Для этого напряжение с одного генератора  $U_{x1}$  подается на вход первого канала осциллографа, а напряжение с другого генератора  $U_{x2}$  – на вход второго канала, как показано на рис. 12.6 (см. Приложение).

### Задание к работе

1. Соберите схему, показанную на рис. 12.1.
2. Проведите измерение неизвестных сопротивлений  $R_{1x}$  и  $R_{2x}$  с помощью вольтметра и амперметра, изменяя величину напряжения генератора постоянного напряжения от  $\sim 1$  до  $\sim 15$  В. Выполните шесть измерений при различных напряжениях.
3. Рассчитайте наиболее вероятное значение каждого сопротивления и его случайную погрешность по формуле для многократных измерений при доверительной вероятности 0,95 [4, Введение, В3, В4, В5].
4. Соберите схему, показанную на рис. 12.2.

**Внимание!** В качестве резистора, обозначенного как  $R_2$ , рекомендуется использовать резистор с сопротивлением, равным 680 Ом, а в качестве резистора, обозначенного на рис. 12.2 как  $R_3$  – резистор 820 Ом. Напряжение генератора установите в диапазоне от 5 до 15 В.

5. С помощью метода равновесия моста постоянного тока определите величины тех же двух неизвестных сопротивлений  $R_{1x}$  и  $R_{2x}$ . Сравните с результатами, полученными в п. 2, 3. Сделайте выводы.
6. Подключите генератор постоянного напряжения к осциллографу (рис. 12.3).
7. Измерьте напряжение сигнала. Назовите форму сигнала.
8. Подключите генератор прямоугольных импульсов к осциллографу (рис. 12.4). Зарисуйте полученный сигнал.
9. Измерьте амплитудное напряжение сигнала. Определите период и частоту сигнала. Назовите форму сигнала.
10. Подключите генератор синусоидального напряжения к осциллографу (рис. 12.5). Зарисуйте полученный сигнал.
11. Измерьте амплитудное напряжение сигнала. Рассчитайте значение действующего напряжения  $U_d$ . Определите период и частоту сигнала. Назовите форму сигнала.
12. Подключите генератор синусоидального напряжения на вход одного канала осциллографа, а генератор прямоугольных импульсов на вход другого канала (рис. 12.6). (Используйте выходы одного прибора, чтобы оба сигнала были синфазны. В таком случае на экране осциллографа будет наблюдаться устойчивая картина.) Переключите управляющие кнопки так, чтобы наблюдать одновременно оба сигнала друг под другом (см. Приложение).
13. Зарисуйте эти сигналы.

### Контрольные вопросы

1. Какие способы измерения сопротивления вам известны?

2. Сформулируйте закон Ома для участка цепи в интегральной и дифференциальной форме. Объясните смысл величин, входящих в законы.
3. Сформулируйте закон Ома для неоднородного участка цепи, т. е. для участка цепи, в котором имеется источник ЭДС.
4. В чем состоит метод измерения сопротивления с помощью моста постоянного тока?
5. Как измерить период и определить частоту сигнала с помощью осциллографа?
6. Как измерить амплитуду сигнала с помощью осциллографа?
7. Как происходит управление электронным пучком в электронном осциллографе?
8. Какова связь между смещением сигнала по оси  $x$  на экране осциллографа и длительностью временного интервала?
9. Как подключить осциллограф по двухканальной схеме?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Калашиников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1977.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).
3. *Электрические измерения*: Учебник для вузов / Под ред. А.В. Фре-мис, Е.М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – С. 39.
4. *Механика и термодинамика*: Метод. указания к вводному занятию и к лабораторным работам № 0 – 6 по физике. № 2848. – Новосибирск, 2004. – С. 11–12 (и последующие издания этого пособия).

### Лабораторная работа № 5

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Цель работы:** Определить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

**Оборудование:** Круглая катушка с магнитной стрелкой, источник постоянного напряжения (выпрямитель), миллиамперметр, потенциометр и переключатели.

## ВВЕДЕНИЕ

Движущиеся заряды (токи) создают в окружающем пространстве магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи), намагниченные тела (например, на стрелку компаса), действуют силы. Благодаря этому на плоский контур с током  $I$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  действует крутящий момент  $\vec{N}$  (рис. 14.1), пропорциональный  $I$ ,  $S$  и  $B$  и зависящий от угла  $\alpha$  между  $\vec{n}$  и  $\vec{B}$

$$N = ISB \sin \alpha \quad (14.1)$$

где  $S$ - площадь контура;

$\vec{n}$ - единичный вектор нормали к плоскости контура.

Таким образом при неизменных  $B$  и  $\alpha$  действие поля на контур определяется величиной  $P_m = IS$ , (14.2) которая называется магнитным моментом контура с током. С учетом (14.2) выражение (14.1) имеет вид

$$N = P_m B \sin \alpha \quad (14.3)$$

где -  $\vec{P}_m$  вектор, направление которого совпадает с направлением единичного вектора нормали  $\vec{n}$ :  $\vec{P}_m = P_m \vec{n}$  (см. рис. 14.1). Из выражения (14.3) (при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ;  $N = N_{max}$ ), следует, что

$$B = \frac{N_{max}}{P_m}, \quad (14.4)$$

т. е. магнитная индукция  $B$  - величина, численно равная максимальному крутящему моменту, который действует на контур с единичным магнитным моментом.  $\vec{B}$ - вектор, совпадающий по направлению с вектором  $\vec{n}$  равновесного (т. е. свободного) контура, ориентированного по полю.  $B$  - зависит от свойств среды, поэтому вводится коэффициент  $\mu$  (относительная магнитная проницаемость среды), показывающий, во сколько раз магнитная индукция  $B$  в данной среде больше, чем индукция  $B_0$  в вакууме.

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (14.2)$$

Напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  тоже силовая его характеристика, но не зависящая от свойств среды.  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  связаны соотношением.

$$\vec{H} = \frac{B}{\mu_0} \quad (14.3)$$

Где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  Г/м.

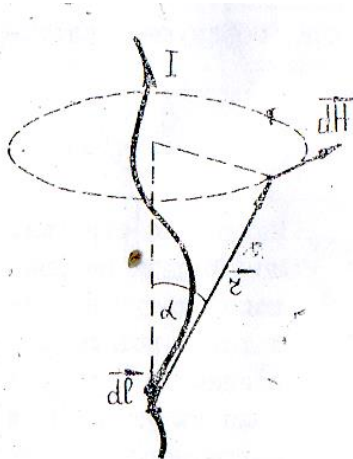


Рис. 14.2

Для напряженности магнитного поля, создаваемого элементом тока длины  $d\ell$ , справедлива формула

$$\vec{dH} = \frac{I |\vec{d\ell} * \vec{r}|}{4\pi r^3},$$

или по модулю

$$dH = \frac{Id\ell \sin(\alpha)}{4\pi r^2} \quad (14.5)$$

где  $I$  — сила тока;

$\vec{d\ell}$  — вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный в сторону его протекания (рис. 14.2);

$\vec{r}$  - вектор проведенный от элемента тока в точку, где определяется  $\vec{dH}$ .

Соотношение (14.5) носит название закона Био- Савара-Лапласа. Направление вектора  $\vec{dH}$  нормально к плоскости, проходящей через  $\vec{d\ell}$  и точку, в которой определяется  $\vec{dH}$ , причем так, что вращение вокруг  $\vec{d\ell}$  в направлении  $\vec{dH}$  связано с  $\vec{d\ell}$  правилом правого винта (см. рис. 14.2);  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{d\ell}$  и  $\vec{r}$ .

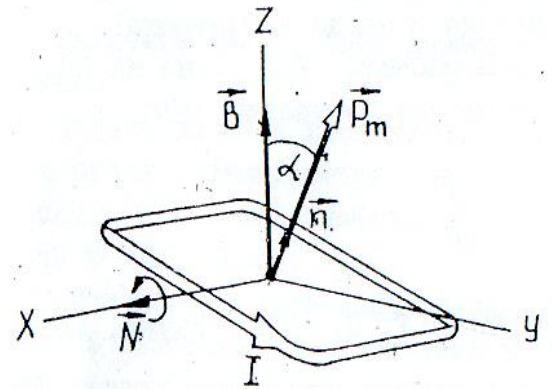


Рис. 14.1

Определим напряженность магнитного поля в центре кругового тока (рис. 14.3). Каждый элемент тока создает в центре напряженность  $d\vec{H}$ , направленную по нормали  $\vec{n}$  к плоскости контура.

На основании закона Био-Савара-Лапласа

$$dH = \frac{I d\ell}{4\pi R^2} \quad (14.6)$$

( $\alpha = \pi/2$ ). Магнитные поля (как и электрические) подчиняются принципу суперпозиции (независимости наложения), согласно которому результирующая напряженность равна векторной сумме напряженностей полей всех элементов с током. В данном случае такую сумму найдем интегрированием выражения (14.6) по всей длине контура с током:

$$H = \frac{I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} d\ell = \frac{I 2\pi R}{4\pi R^2} = \frac{I}{2R}$$

Если круговой ток состоит из  $N$  витков, образующих катушку, то  $H$  будет в  $N$  раз больше:

$$H = \frac{IN}{2R} \quad (14.7)$$

Магнитная стрелка, помещенная внутрь катушки, находится под воздействием двух полей: поля катушки  $\vec{H}$  и магнитного поля Земли.

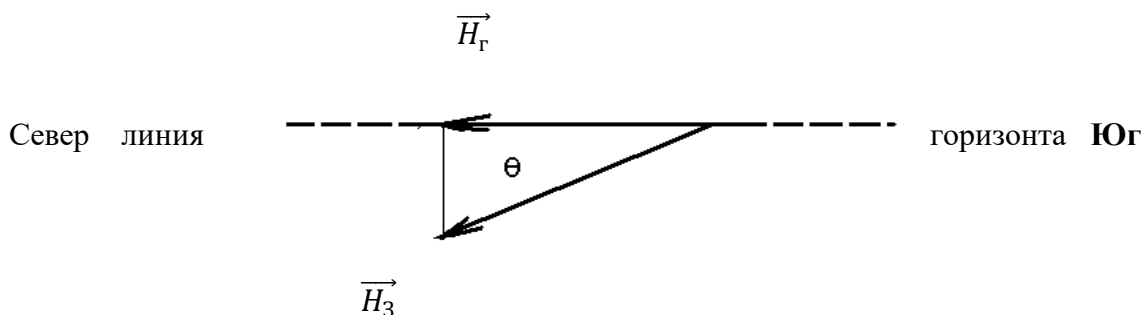


Рис. 14.4

На широте Москвы результирующий вектор напряженности Земли  $\vec{H}_3$  направлен под некоторым углом  $\Theta$  к горизонту (рис. 14.4), поэтому на стрелку, вращающуюся вокруг закрепленной вертикальной оси, будет действовать лишь его горизонтальная составляющая  $\vec{H}_r$ .

#### Описание установки и метода измерения.

В корпусе компаса имеется лупа и призма, через которые видны деления лимба, укрепленного на магнитной стрелке. Одновременно наблюдатель видит ви-

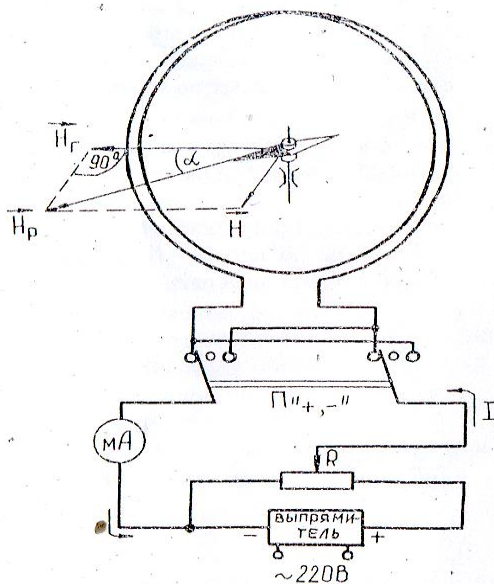


Рис. 14.5

зирную нить, от которой осуществляется отсчет делений в градусах.

Если визирную нить установить против деления  $90^0$  (или  $270^0$ ), то плоскость витков катушки совмещается с направлением,  $\vec{H}_r$  т. е. приблизительно с направлением Север-Юг (см. рис 14.4). Теперь при включении тока в катушке напряженность поля оказывается нормальной вектору,  $\vec{H}_r$ , и магнитная стрелка располагается вдоль результирующей напряженности  $\vec{H}_r$ .

Из диаграммы векторов на рис. 14.5 следует, что

$$H_r = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (14.8)$$

### Порядок выполнения работы

1. Повернуть стенд с катушкой до совпадения визирной нити с делением  $90^0$  ( $270^0$ ).
2. Переключателем СЕТЬ включить питание, при этом загорается индикационная лампочка.
3. С помощью переключателя с надписью 1, 2, 3, включить в схему катушку с наибольшим числом витков.
4. Потенциометром R установить ток, соответствующий углу отклонения  $\alpha$  магнитной стрелки от деления  $90^0$  ( $270^0$ ) равному  $45^0$  и записать величину этого тока по миллиамперметру.
5. Потенциометром R последовательно установить угол  $\alpha$  отклонения в пределах от  $45^0$  до  $0^0$  через пять одинаковых интервалов, записывая соответствующие этим углам токи по миллиамперметру.
6. Переключателем с надписью «+, -» изменить направление тока в катушке. В порядке возрастания, последовательно установить пять значений токов, полученных в п. 5, записав соответствующие этим токам, пять значений углов  $\alpha$ .
7. Переключателем с надписью 1, 2, 3, включить в схему катушку с другим числом витков (по согласованию с преподавателем) и проделать измерения по п. 4, 5, и 6.
8. По формуле (14.7) рассчитать десять значений  $H$ , используя  $5 \times 2$  полученных значений токов  $I$ , и числа витков  $N$ , указанные на каждой из катушек. (Диаметры катушек измерять при помощи линейки.)
9. Взяв среднее значение для каждой пары углов  $\alpha$  (влево и вправо), определить по формуле (14.8) десять значений  $H_r$  рассчитать  $H_{гср}$ .
10. Найти  $\Delta H_r$  и  $(\Delta H_r)^2$ .
11. Рассчитать среднюю квадратичную ошибку

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta H_r)_i^2}$$

где  $n$  — число значений  $H_r$ .

12. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 14.1
13. Окончательный результат для  $H_r$  представить в виде

$$H_r = H_{ср} \pm 2\sigma$$

Таблица 14.1.

Число витков	№ п.п.	I, мА	влево град $\alpha$	вправо град $\alpha$	град. $\alpha_{\text{ср}}$	H, А/м	H <sub>г</sub> А/м	H <sub>ср</sub> А/м	$\Delta H_{\text{г}}$ А/м	$(\Delta H_{\text{г}})^2$ (А/м) <sup>2</sup>

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется магнитным моментом?
2. Что такое индукция магнитного поля?
3. Каков смысл относительной магнитной проницаемости?
4. Что такое напряженность магнитного поля и в чем ее отличие от индукции?
5. Запишите и поясните смысл закона Био - Савара - Лапласа.
6. Что такое принцип суперпозиции?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2, изд. С1978, гл. VI, § 40,42.
2. Зисман Г.А. Тодес О.М. Курс общей физики. Т. П. Любое издание, гл. VII, §30.

### Лабораторная работа №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** Экспериментальная проверка теоретической зависимости периода гармонических колебаний от коэффициента жесткости пружины и массы колеблющегося тела.

**Оборудование:** Набор пружин и грузов, миллиметровая линейка, математический маятник, секундомер.

### Задание.

1. Изучить теорию гармонических колебаний.
2. Рассчитать статическим методом коэффициент жесткости пружины.
3. Построить график зависимости периода собственных колебаний пружинного маятника от массы груза.
4. Построить график зависимости периода собственных колебаний пружинного маятника от коэффициента жесткости пружины.
5. С помощью математического маятника экспериментально получить значение ускорения свободного падения и оценить его погрешность.

## ВВЕДЕНИЕ

### Основные теоретические сведения и соотношения.

Все колебательные процессы, практически встречающиеся в физике и технике, разделяются на два класса - периодические и непериодические. Периодическим называется такое движение системы, при котором, начиная с определенного момента времени, все ее положения периодически повторяются.

Математическое определение периодической величины таково: функция  $f(t)$  называется периодической с периодом  $T$ , если  $f(t+T)=f(t)$ .

Примером периодического процесса являются гармонические колебания,

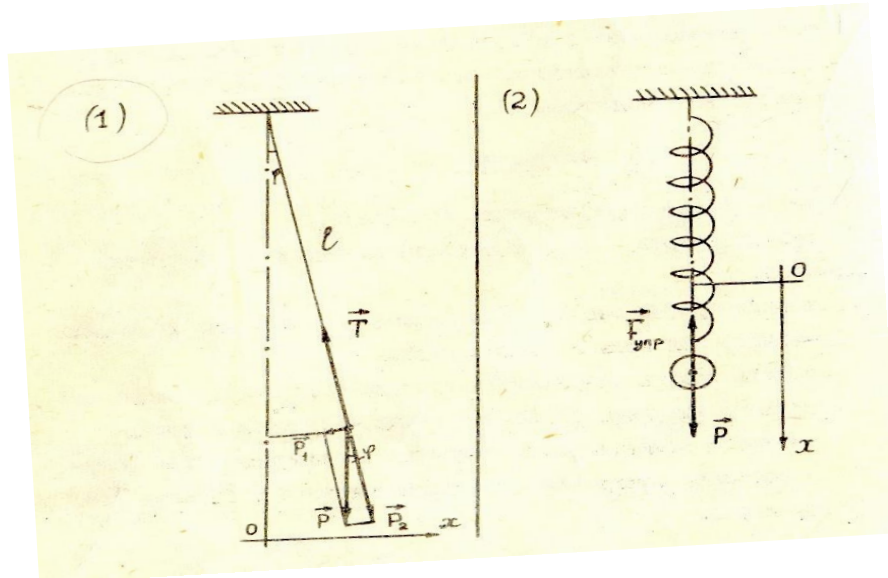


Рис 1.

при которых изменение наблюдаемой величины происходит по закону синуса или косинуса.

Рассмотрим две колебательные системы: математический (1) и пружинный (2) маятники (рис. 1).

### Дифференциальное уравнение собственных (в отсутствии затухания) колебаний.

Математический маятник	Пружинный маятник
<p>На груз действует сила тяжести <math>\vec{P} = m\vec{g}</math> и сила натяжения нити <math>\vec{T}</math>. Разложим силу тяжести на две составляющие <math>\vec{P}_1</math> и <math>\vec{P}_2</math>. Если угол отклонения <math>\varphi</math> мал, то дугу траектории груза можно считать приближенно прямой и для отклонения груза от положения равновесия запишем:</p> $x \approx l \cdot \varphi. \quad (1.1)$ <p>Сила <math>\vec{P}_2</math> уравновешивается натяжением ни-</p>	<p>На груз действуют силы тяжести <math>\vec{P} = m\vec{g}</math> и сила упругости <math>\vec{F}_{\text{упр}}</math>. При смещении груза от положения равновесия <math>x</math>, на него будет действовать результирующая сила</p> $F = mg - F_{\text{упр}} = mg - k(\Delta l + x) \quad (2.1)$ <p>где <math>k</math> – коэффициент жесткости пружины, <math>\Delta l</math> – статистическое удлинение.</p> <p>Учитывая, что в положении равновесия (<math>x=0</math>), сила тяжести уравновешивается си-</p>



<p>ти, а сила <math>\vec{P}_1</math>, действующая вдоль траектории, будет возвращать маятник в положение равновесия (<math>x=0</math>). При малом угле <math>\varphi</math> она равна <math>mg \sin \varphi</math> или с учетом (1.1)</p> $P_1 = -\frac{mg}{l} \cdot x. \quad (1.2)$ <p>Знак «-» указывает на то, что сила <math>\vec{P}_1</math> направлена противоположно положительному направлению координаты смещения <math>x</math>. Уравнение движения груза имеет вид:</p> $m\ddot{x} = P_1. \quad (1.3)$ <p>Преобразуем это уравнение с учетом (1.2) следующим образом:</p> $\ddot{x} + \frac{g}{l} x = 0. \quad (1.4)$ <p>Произведя замены:</p> $\frac{g}{l} = \omega^2,$	<p>лой упругости <math>mg = k\Delta l</math>, из (2.1) следует:</p> $F = -kx. \quad (2.2)$ <p>Сила <math>\vec{F}</math> направлена в сторону равновесия, т.е. в сторону, противоположную смещению <math>x</math>. Уравнение движения груза принимает вид:</p> $m\ddot{x} = -kx. \quad (2.3)$ <p>Преобразуем (2.3) следующим образом:</p> $\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0. \quad (2.4)$ <p>Произведя замены:</p> $\frac{k}{m} = \omega^2,$
---	---

получим окончательно:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) является линейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами, общее решение которого имеет вид:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (6)$$

Здесь:  $A$  — амплитуда;  $\omega_0$  — круговая частота;  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний.

Период собственных колебаний.

<i>Математический маятник</i>	<i>Пружинный маятник</i>
$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.7)$	$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (2.7)$

Таким образом, колебания обеих систем под действием квазиупругих сил, т. е. сил неупругих по своей природе, но линейно зависящих от величины смещения относительно

положения равновесия (см. 1.2 и 2.2) в отсутствие затухания описываются гармоническим законом.

### Описание лабораторной установки.

Установка состоит из штатива, на котором поочередно подвешиваются на различных пружинах грузики разного веса или математический маятник. Штатив снабжен шкалой с сантиметровыми делениями.

### Методика и порядок выполнения лабораторной работы.

#### 1. Определение коэффициента жесткости пружины статическим методом.

1. Подвешивают пружину на штатив и измеряют с помощью линейки ее длину.
2. Подвешивают на конец пружины поочередно грузики различной массы и измеряют удлинение пружины  $\Delta\ell$ . Удлинение пружины не должно превышать 30-40 мм.
3. Вычислить для каждой пружины коэффициент жесткости  $k$  по формуле  $k = \frac{P}{\Delta\ell}$  для трех грузов.
4. Вычислить среднее значение коэффициента жесткости для каждой пружины  $k_{\text{ср}}$ .
5. Занести все измеренные и вычисленные результаты в таблицу 1.

Таблица 1

№ груза	Пружина №1					Пружина №2					Пружина №3				
	P	$\Delta\ell$	k	$k_{\text{ср}}$	$k'$	P	$\Delta\ell$	k	$k_{\text{ср}}$	$k'$	P	$\Delta\ell$	k	$k_{\text{ср}}$	$k'$
размерность															
1															
2															
3															

#### 2. Определение зависимости периода собственных колебаний пружинного маятника от массы.

1. Отводят груз, подвешенный на пружине, на 20 -30 мм от положения равновесия и измеряют секундомером время  $t$ , в течение которого маятник совершит  $n=20$  полных колебаний.
2. Вычисляют периода собственных колебаний  $T = \frac{t}{n}$  для пружины №1 при трех различных грузах.
3. Вычисляют значения  $T^2$ .
4. Измерения на каждом грузе проводят три раза и вычисляют  $T_{\text{ср}}^2$
5. Заносят все измерения и вычисленные результаты в таблицу 2.
6. Строят график зависимости  $T_{\text{ср}}^2 = f(m)$  для пружины №1, откладывая по оси абсцисс массу груза.

Таблица №2

№/№	Пружина №1									Пружина №2			Пружина №3		
	$m_1 =$			$m_2 =$			$m_3 =$			$m_1 =$			$m_1 =$		
	t	T	$T^2$	t	T	$T^2$	t	T	$T^2$	t	T	$T^2$	t	T	$T^2$
размерность															
1															
2															
3															
Среднее значение															

### 3. Определение зависимости периода собственных колебаний пружинного маятника от коэффициента жесткости пружины.

1. Проводят измерения и вычисления, аналогичные п.п. 5.2 1-3. для пружин № 2 и 3 с грузом  $m_1$ .
2. Заносят измеренные и вычисленные значения в таблицу 2.
3. Строят график зависимости  $T_{cp}^2 = f(k_{cp})$  для трех пружин на одном и том же грузе  $m_1$ , используя данные таблицы 1 и откладывая по оси абсцисс значения коэффициента жесткости  $k_{cp}$ .
4. Используя формулу (2.7) и данные таблицы 2, вычисляют значения коэффициентов жесткости трех пружин при одном и том же грузе  $m_1$ .
5. Заносят полученные данные в таблицу 1 (графа  $k'$ ) и сравнивают их со значениями  $k$ , полученными статическим методом.

### 4. Определение ускорения свободного падения $g$ математического маятника.

1. Подвешивают на штатив математический маятник.
2. Измеряют по шкале длину нити  $\ell_n$  (значение диаметра шарика груза  $d$  приведено на установке).
3. Отводят маятник от положения равновесия на угол  $5-6^\circ$  и измеряют секундомером время  $t$ , в течение которого маятник совершает  $n=20$  полных колебаний.
4. Измерения  $\ell_n$  и  $t$  проводят 4 раза.
5. Вычисляют значения  $T = \frac{t}{n}$  результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 3.
6. По правилам раздела 7.1 Введения рассчитывают погрешности  $\Delta T_{кв}$  и  $\Delta \ell_{кв}$ .  
Промежуточные вычисления  $\Delta \ell_i = |\ell_i - \bar{\ell}|$  и  $\Delta T_i = |T_i - \bar{T}|$  заносят в таблицу 3.
7. Записывают промежуточные ответы

$$T = \bar{T} \pm \Delta T_{кв}, \quad \ell = \bar{\ell} \pm \Delta \ell_{кв}.$$

8. Определяют величину  $g$ , подставляя в формулу 1.7 значения  $\bar{T}$  и  $\ell = \bar{\ell} + \frac{d}{2}$ .
9. Пользуясь правилами раздела 7.3.1 Введения, рассчитывают погрешности  $\Delta g_{сис\tau}$ ,  $\Delta g_s$  (с надежностью  $\beta=0,7$ ),  $\Delta g_{полн}$ , относительную погрешность  $\varepsilon = \frac{\Delta g_{полн}}{g} 100\%$ .

10. Записывают ответ:

$$g = \bar{g} \pm \Delta g_{\text{полн}} \quad \text{с надежностью } \beta=0,7, \quad \varepsilon = \underline{\hspace{1cm}} \%$$

Таблица №3

№ п/п	$\ell_n$	$\Delta \ell_i$	t	T	$\Delta T_i$
размерность					
1					
2					
3					
4					
Среднее значение					

### Содержание отчета

1. Наименование и номер работы.
2. Цель работы.
3. Задание.
4. Рисунок 13, уравнение (5), его решение (6), формулы (1,7) и (2.7).
5. Результаты измерений и вычислений в виде графиков и таблиц по всем разделам 5.1-4.
6. Расчеты погрешностей и конечный ответ для g в разделе 5.4.
7. Основные выводы по результатам исследований.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему выведенные из положения равновесия и предоставленные сами себе маятники совершают колебательное движение.
2. Какие процессы называются периодическими, приведите примеры.
3. Получите дифференциальное уравнение гармонических колебаний, запишите его решение, объясните физический смысл входящих в решение постоянных.
4. Какой маятник называется математическим, и при каких условиях его колебания будут гармоническими.
5. Пользуясь формулой для расчета погрешности  $\Delta g$ , определите пути повышения точности измерения ускорения свободного падения, g в разделе 5.4.

### ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики т. 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН

**Цель работы:** Исследовать образование стоячих волн на струне, определить фазовую скорость бегущей волны на струне и плотность материала струны.

**Оборудование:** Установка ФПВ-04, включающая в себя струну с регулируемым натяжением, генератор синусоидального сигнала, постоянный магнит, линейку с миллиметровыми делениями.

## ВВЕДЕНИЕ

Механические колебания, возникающие в любой точке  $x = 0$  среды (рис. 1), распространяются в ней благодаря наличию упругих связей между частицами вещества. Процесс распространения колебаний называется волной.

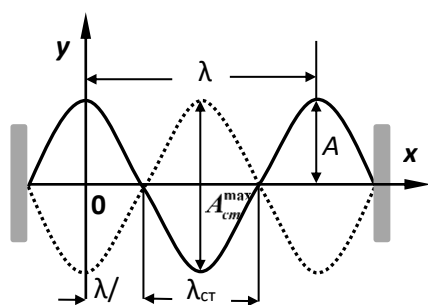


Рис.1. Схема

Если на пути бегущей волны (рис. 1, сплошная кривая) встречается препятствие, то волна отражается от него. Отраженная (рис. 1, пунктирная кривая) и падающая волны интерферируют, образуя стоячую волну.

Уравнение бегущей вдоль оси  $Ox$  волны имеет вид:

$$y_1 = A \cos(\omega t - kx). \quad (1)$$

Для отраженной волны справедливо:

$$y_2 = A \cos(\omega t + kx). \quad (2)$$

Здесь  $A$  — амплитуда колебаний частиц среды;  $\omega = 2\pi\nu$  — циклическая частота;  $\nu$  — частота колебаний;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны;  $x$  — расстояние, пройденное волной за время  $t$ . Складывая представленные соотношения и преобразуя результат по формуле для суммы косинусов, получаем уравнение стоячей волны:

$$y = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos(\omega t). \quad (3)$$

Амплитуда стоячей волны

$$A_{cm} = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

зависит от координаты  $x$  и принимает значения от  $A_{cm}^{\min} = 0$  до  $A_{cm}^{\max} = 2A$  (рис. 1).

Точки, в которых амплитуда минимальна ( $A_{cm}^{\min} = 0$ ), называются узлами стоячей волны. Координаты узлов определяются условием:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) = 0 \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} x = \pm\left(\frac{1}{2} + m\right)\pi \Rightarrow x = \pm\left(\frac{1}{2} + m\right)\frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Точки, в которых амплитуда максимальна ( $A_{cm}^{max} = 2A$ ), называются пучностями и имеют координаты, определяемые соотношением:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) = \pm 1 \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}x = \pm m\pi \Rightarrow x = \pm m\frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Расстояние между соседними узлами или пучностями стоячей волны называется длиной стоячей волны  $\lambda_{cm}$  и равно (рис. 1) половине длины  $\lambda$  бегущей волны:

$$\lambda_{cm} = \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

В лабораторной установке (рис. 2) поперечные колебания натянутой струны (1) возбуждаются силой Ампера, действующей со стороны магнитного поля постоянного магнита (2) на проводник (струна) с током, подключенный к выходу синусоидального сигнала генератора (3). Бегущая волна, дойдя до места крепления струны, отражается. При этом падающая и отраженная волны накладываются друг на друга, образуя стоячую волну.

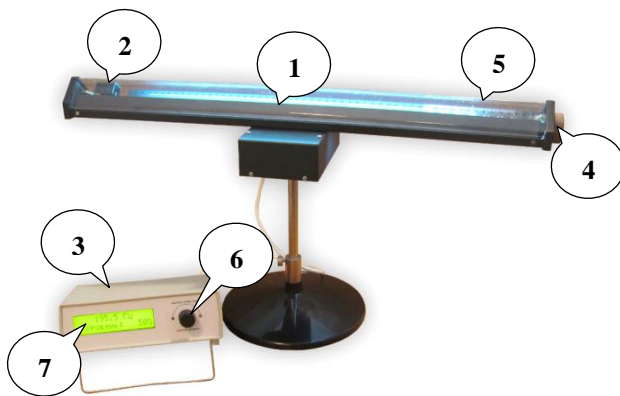


Рис. 2. Экспериментальная установка

Так как точки закрепленной с обоих концов струны являются узлами стоячих волн, то в струне возбуждаются лишь колебания, при которых на длине струны  $L$  укладывается целое число  $n = 1, 2, 3, \dots$  полудлин бегущих волн, или целое число длин стоячих волн:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} = n \lambda_{cm,n}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что на струне стоячая волна возникает только в том случае, если ее длина (рис. 3) будет равна любому значению из дискретного ряда:

$$\lambda_{cm,n} = \frac{L}{n}. \quad (8)$$

Каждой длине бегущей волны  $\lambda_n$  соответствует собственная частота колебаний струны:

$$\nu_n = \frac{v}{\lambda_n}, \quad (9)$$

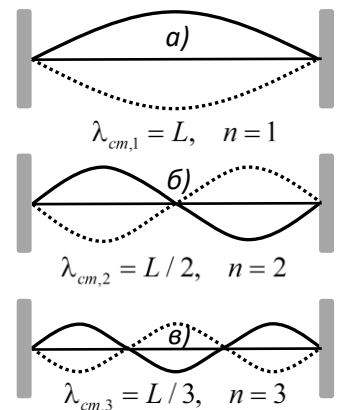


Рис. 3

где  $v$  — фазовая скорость волны — скорость распространения фазы колебания в струне, или скорость звука. Частота  $\nu_1$  ( $n = 1$ ) называется основной. Частоты, отвечающие значе-

ниям  $n=2, 3, 4, \dots$  называются обертонами. Таким образом, у струны имеется целый набор колебаний и, соответственно, целый набор собственных частот, кратных основной частоте.

Фазовая скорость, в свою очередь, зависит от силы  $T$  натяжения струны:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho S}}, \quad (10)$$

где  $\rho$  — плотность материала струны и  $S$  — площадь ее поперечного сечения. Поэтому, меняя  $T$ , можно получать многочисленные наборы собственных частот. В лабораторной установке (рис.2) натяжение струны (1) осуществляется рукояткой (4) винтового механизма, связанного с пружиной, прикрепленной к одной из сторон струны. Величина силы  $T$  натяжения струны отображается на шкале (5).

Особенность стоячих волн состоит в том, что они не имеют направления распространения, не переносят энергию колебательного движения. Частицы колеблющейся среды, находящиеся в узлах стоячей волны, всегда покоятся, а координаты узлов во времени и в пространстве не меняются.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### *Задание 1. Определить собственные частоты колебаний и длины стоячих волн для различных натяжений струны*

1. Подключить лабораторную установку (рис. 2) к сети 220 В.
2. Подготовить четыре таблицы, подобные таблице 1.

Таблица 1

$T_i = \text{--- Н}$				
$n$	$\nu$ , Гц	$\lambda_{cm} 10^{-3}$ , м	$v$ , м/с	$v_{cp}$ , м/с
1				
2				
3				
4				
5				

3. Над каждой таблицей записать одно из четырех заданных преподавателем значений силы  $T_i$  ( $0,1 \div 0,6$  Н) натяжения струны, начиная с наименьшего.
4. Вращая винт (4), выставить на шкале (5) минимальное значение силы  $T_1$ .
5. Вращая рукоятку (6) генератора (3) и, тем самым, изменяя частоту с шагом 1 Гц, добиться возникновения на струне хорошо различимой стоячей волны основного тона ( $n = 1$ ), представленной на рисунке 3, а. Отметить показание частоты с цифрового табло (7) частотомера.  
Замечание. Кратковременное нажатие вдоль оси на рукоятку (6) позволит изменять частоту через 0,1 Гц.
6. Повторить процесс измерения п.5. Записать в таблицу среднее значение частоты.
7. Определить длину стоячей волны по миллиметровой шкале, нанесенной на прозрачный кожух, закрывающий струну, и внести ее значение в таблицу.

8. Увеличивая частоту генератора, получить устойчивые картины стоячих волн (рис. 3) для обертонов  $n = 2, 3, 4, 5$ , выполняя п.п. 5 и 7.
9. Прodelать п.п. 4 – 8 для сил натяжения струны  $T_2, T_3, T_4$ .

**Задание 2. Исследовать зависимость собственной частоты от номера обертона**

1. Построить зависимость  $\nu = f(n)$  собственной частоты от номера обертона для всех значений силы натяжения струны в одних координатных осях, используя данные для  $n$  и  $\nu$  из таблиц задания 1.
2. Определить по графикам частоты обертонов, следующих за наибольшим заданным.

**Задание 3. Исследовать зависимость фазовой скорости от силы натяжения струны**

Из соотношений (6) и (9) следует, что фазовая скорость:

$$v = 2\nu_n \cdot \lambda_{ст,n} . \quad (11)$$

1. Рассчитать фазовую скорость волны по формуле (11) для каждого обертона всех значений силы натяжения струны, используя результаты задания 1, и записать ее значение в ту же таблицу.
2. Вычислить среднее значение фазовой скорости для каждой силы натяжения струны

$$v_{cp} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v_i \quad (12)$$

и записать результат в таблицу задания 1.

3. Для каждой силы натяжения  $T_i$  записать в таблицу 2 среднюю фазовую скорость

Таблица 2

№/№	$T, \text{ Н}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v^2, \text{ м}^2/\text{с}^2$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{cp}, \text{ кг/м}^3$	$\Delta\rho, \text{ кг/м}^3$	$\Delta\rho_{cp}, \text{ кг/м}^3$
1.							
2.							
3.							
4.							

5. Возвести в квадрат среднюю фазовую скорость, и записать результат в таблицу 2.
6. Используя данные таблицы 2, построить график зависимости квадрата фазовой скорости от силы натяжения струны.
7. По виду графика сделать заключение о зависимости фазовой скорости от силы натяжения струны.

**Задание 4. Определить плотность материала струны**

1. Из соотношения (10) получить формулу для определения плотности струны  $\rho$ .



2. Учитывая, что площадь поперечного сечения струны  $S = \pi d^2/4$  и  $d = 1,35 \cdot 10^{-4}$  м — диаметр струны, вычислить плотность для каждого значения силы натяжения струны и записать в таблицу 2.
3. Найти среднее значение плотности.
4. Вычислить абсолютную погрешность плотности для каждого значения силы натяжения струны:

$$\Delta \rho_i = |\rho_{cp} - \rho_i| \quad (13)$$

и найти среднюю абсолютную погрешность  $\Delta \rho_{cp}$ .

5. Вычислить относительную погрешность плотности по формуле:

$$\delta \rho = \frac{\Delta \rho_{cp}}{\rho_{cp}} \cdot 100\% . \quad (14)$$

6. Представить плотность материала струны в виде:

$$\rho = (\rho_{cp} \pm \Delta \rho_{cp}) \text{ кг/м}^3; \quad \delta \rho = \_\_\_\% . \quad (15)$$

7. Вычислить плотность, определив отношение  $T/v^2$  из графика.
8. По таблицам плотности (Интернет) определить материал струны.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ЗАДАНИЯ)

1. Записать уравнения бегущей и отраженной волны, пояснить физический смысл входящих в них параметров.
2. Указать условия, необходимые для образования стоячих волн.
3. Записать уравнение стоячей волны и пояснить физический смысл входящих в это уравнение параметров.
4. Указать основные различия между бегущей и стоячей волной.
5. Указать связь амплитуды стоячей и бегущей волн.
6. Дать определение узлу и пучности стоячей волны.
7. Указать координаты узлов и пучностей стоячей волны.
8. Записать связь длины бегущей волны с длиной стоячей волны.
9. Определить длину струны по известной длине стоячей волны для заданного обертона.
10. Дать определение собственной частоты стоячей волны.
11. Записать формулу связи частоты стоячей волны с длиной струны и фазовой скоростью.
12. От каких физических величин зависит фазовая скорость стоячей волны?
13. Осуществляется ли перенос энергии в стоячих волнах?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

**Цель работы:** Изучение основных законов внешнего фотоэффекта, снятие вольтамперной и световой характеристик, определение интегральной и спектральной чувствительности фотоэлемента (ФЭ).

### Задание

1. Изучить экспериментальные закономерности внешнего фотоэффекта.
2. Изучить квантовую теорию фотоэффекта.
3. Снять вольтамперную характеристику ФЭ  $I = f(U)$ .
4. Снять световую характеристику ФЭ  $I_H = f(\Phi)$ .
5. Рассчитать интегральную чувствительность ФЭ для среднего участка световой характеристики.
6. Определить спектральную чувствительность ФЭ и снять зависимость силы тока от длины волны света  $I_H = f(\lambda)$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Внешний фотоэффект — это испускание электронов веществом под действием света. Внешний фотоэффект был открыт в 1887 году Г. Герцем и впервые исследован в 1888 году русским ученым А. Г. Столетовым, установившим экспериментальные законы этого явления:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется только частотой света и не зависит от его интенсивности.
2. При фиксированной частоте падающего света сила фототока насыщения (полное число электронов, покидающих металл за 1 с) пропорциональна величине падающего светового потока

$$I_H \sim \Phi. \quad (1)$$

3. Для каждого вещества существует минимальная частота (так называемая «красная граница» фотоэффекта), при которой еще возможен фотоэффект.

С точки зрения классической волновой теории света законы фотоэффекта не объяснимы. Они были впервые объяснены в 1905 году Эйнштейном на основе гипотезы о том, что свет представляет собой поток частиц - фотонов. Энергия фотона определяется выражением

$$\varepsilon = h\nu \quad (2)$$

Где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота света.

Внешний фотоэффект в металлах является результатом взаимодействия фотонов с находящимися у поверхности металла электронами проводимости.

При столкновении с одним из таких электронов фотон полностью передает ему свою энергию, и если она достаточно велика, электрон может преодолеть силы, удерживающие его в металле, и вылететь наружу. Каждый фотоэлектрон выбивается одним фотоном, поэтому его скорость определяется лишь энергией фотона, т.е. частотой падающего света (1-й закон).

Падающий на вещество световой поток определяется числом фотонов, попадающих на поверхность в единицу времени. В то же время и полное число высвобожденных фотоэлектронов должно быть пропорционально числу падающих на поверхность фотонов. В соответствии с этим ток насыщения будет прямо пропорционален световому потоку (2-й закон).

Применив к электрон – фотонному столкновению закон сохранения энергии, Эйнштейн получил уравнение

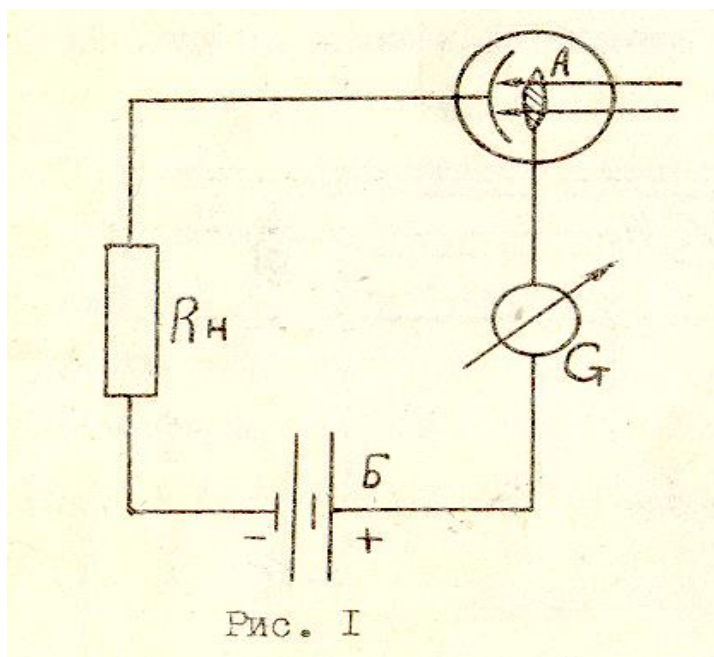
$$h\nu = \frac{mv_m^2}{2} + A \quad (3)$$

где:  $m$  – масса электрона;  $A$  – работа его выхода;  $v_m$  – максимальная скорость фотоэлектрона.

Это уравнение объясняет существование «красной границы» фотоэффекта: электрон не может покинуть металл, если энергия переданная ему фотоном, меньше работы выхода  $A$ , поэтому частота  $\nu_0$  света, при которой еще возможен фотоэффект, определяется соотношением  $h\nu_0 = A$  (3-й закон).

Внешний фотоэффект находит большое применение на практике. На этом явлении основано действие фотоэлементов, фотоумножителей, электроннооптических преобразователей, которые широко используются в кино, телевидении, схемах автоматического контроля, различных системах связи и т.д.

### Описание лабораторной установки



В работе используется действие фотоэлемента СЦВ-4 (сурьмяно-цезиевый вакуумный) с центральным анодом в виде сетки (рис.1) Катод состоит из напыленных на внутреннюю поверхность стеклянного баллона последовательных тонких слоев сурьмы и цезия. Электроны вырываемые светом из освещенного катода, летят на анод А, ускоряемые электрическим полем, создаваемым батареей Б. Фототок, текущий в цепи фотоэлемента регистрируется гальванометром Г.

В фотоэлементах используется прямая зависимость фототока от величины падающего светового потока, т.е. нормальный режим работы фотоэлемента – режим

насыщения, при котором величина напряжения, прилагаемого между анодом и катодом, достаточна для того, чтобы все фотоэлектроны, вырванные из катода, достигли анода.

Основными характеристиками вакуумных фотоэлементов являются:

1. Спектральная чувствительность фотокатода, которая определяет область спектра, где может быть использован данный фотоэлемент.
2. Вольтамперная характеристика, определяющая зависимость величины фототока насыщения  $I_H$  от величины падающего светового потока  $\Phi$  при постоянном напряжении между катодом и анодом.

Схема экспериментальной установки приведена на рис 2.

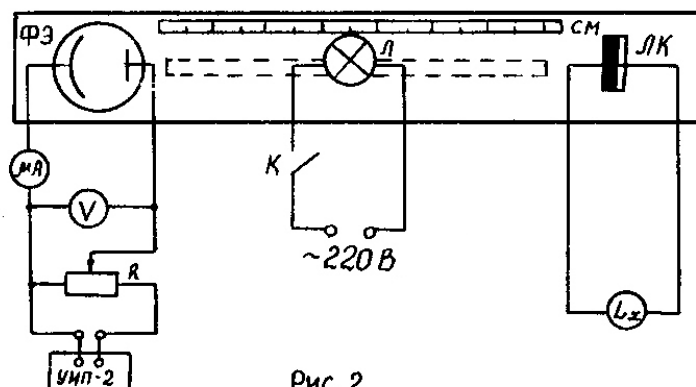


Рис. 2

Основными частями установки являются фотоэлемент (ФЭ), лампа накаливания Л (220В, 100Вт), люксметр (ЛК), предназначенный для измерения освещенности Е. Фотоэлемент и датчик люксметра помещены в светозащитные кожухи, лампа Л имеет возможность передвигаться по панели в горизонтальном направлении. Расстояние  $r$  между лампой и ФЭ (ЛК) измеряется по сантиметровой шкале, нанесенной на панель установки. Лампа помещена в кожух, позволяющий помещать по ходу светового пучка различные фильтры. В комплект установки входит набор стеклянных светофильтров, позволяющих выделять из спектра лампы накаливания различные участки. Пропускание светофильтров указано в их паспортах прилагаемых к установке.

Датчик ЛК представляет собой вентильный фотоэлемент (его работа основана на явлении внутреннего фотоэффекта).

Величина падающего на фотоэлемент светового потока может быть рассчитана по формуле  $\Phi = ES_k$ , где  $E$  – освещенность ФЭ в люксах;  $S_k$  – площадь катода в  $m^2$ . Значение  $S_k$  указано на установке.

Конструктивно фотоэлемент питается от источника питания УИП-2, ручка реостата  $R$  выведена на переднюю панель этого прибора. Вольтметр  $V$ , измеряющий напряжение на ФЭ и микроамперметр  $\mu A$ , измеряющий величину фототока Ю помещены на панели экспериментальной установки.

## Методика выполнения лабораторной работы

### 1. Снятие вольтамперной характеристики

1. Включают в сеть УИП-2 и дают ему прогреться 5 минут.
2. Вращая ручку потенциометра  $R$ , подают на ФЭ 200В, при этом темновой ток фотоэлемента должен быть равен нулю. Убедившись в отсутствии темнового тока, уменьшаем напряжение до нуля.
3. Включают лампу в сеть кнопкой  $K$ .
4. Помещают лампу на расстояние 20-25 см от ФЭ.
5. Изменяя напряжение на ФЭ от 0 до 240 В (до 60В через 10 В, далее через 20В, регистрируют величину силы фототока по микроамперметру.
6. Данные заносят в таблицу.

Таблица1.

U, В	
I, $\mu A$	

- Строят график зависимости  $I=f(U)$ , откладывая по оси абсцисс значение напряжения  $U$ .

## 2. Снятие световой характеристики

- Подают на ФЭ напряжение 240В.
- Устанавливают лампу на расстояние, при котором стрелка микроамперметра отклоняется на 2/3 шкалы.
- Удаляют лампу от Фотоэлемента на разные расстояния (снимают 5 точек), записывая показания приборов (значения токов и расстояний).
- Повторяют измерения, возвращая лампу в первоначальное положение, вычисляют значения  $I_H = \frac{I_{\text{пр}} + I_{\text{обр}}}{2}$ .
- Последовательно устанавливают лампу перед датчиком ЛК на тех же расстояниях  $r$ , фиксируют показания люксметра по верхней шкале.
- Проводят измерения в прямом и обратном направлениях, рассчитывают значения  $E = \frac{E_{\text{пр}} + E_{\text{обр}}}{2}$ .
- По формуле (5) определяют для каждого  $r$  величину светового потока.
- Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 2.
- Полагая, что при напряжении 240 В все фотоэлектроны достигают анода, строят зависимость  $I_H = f(\Phi)$  откладывая по оси абсцисс значения  $\Phi$ .

Таблица 2.

№/№	$r$	$I_{\text{пр.}}$	$I_{\text{обр.}}$	$I_H$	$E_{\text{пр.}}$	$E_{\text{обр.}}$	$E$	$\Phi$
размерность								
1								
2								
3								
4								
5								

## Определение спектральной чувствительности.

- Помещают лампу на таком расстоянии от ФЭ, работающего в режиме насыщения, при котором стрелка  $\mu\text{A}$  дает отброс на 4/5 шкалы.
- Последовательно помещая перед лампой различные светофильтры, фиксируют показания микроамперметра.
- Используя зависимость испускательной способности вольфрама от длины волны и кривые пропускания светофильтров, рассчитывают истинные значения фототока  $I_{\text{ни}}$

$$I_{\text{ни}} = \frac{I_{\text{ни}}}{r_{\lambda} T_{\lambda}}. \quad (7)$$

Где:  $r_{\lambda}$  - испускательная способность вольфрама при длине волны, соответствующей максимуму пропускания светофильтра  $\lambda_{\text{мах}}$ .  $T_{\lambda}$  - пропускание светофильтра в % при длине волны  $\lambda_{\text{мах}}$ . Значения  $\lambda$  и  $T_{\lambda}$  находят из соответствующих кривых, приведенных в приложении и паспортов светофильтров.

- Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 3.

Таблица 3.

№ свето- фильтра	$\lambda_{\max}$	$I_n$	$r_\lambda$	$\tau_\lambda$	$I_{\text{ни}}$
размерность					
1					
2					
3					
4					
5					
6					

5. Строят график зависимости  $I_{\text{ни}} = f(\lambda)$  откладывая по оси абсцисс значения  $\lambda_{\max}$ .
6. Определяют по графику предельную длину волны, при которой еще наблюдается фотоэффект.
7. Вычисляют «красную границу фотоэффекта».

#### 4. Содержание отчета

1. Название и номер работы.
2. Цель работы.
3. Задание.
4. Экспериментальные законы внешнего фотоэффекта.
5. Уравнение Эйнштейна.
6. Принципиальная схема установки.
7. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц, графиков по всем разделам 5.1-3.
8. Основные выводы по результатам исследования.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление фотоэффекта?
2. В чем состоит различие между внешним и внутренним фотоэффектом?
3. Сформулируйте экспериментальные законы внешнего фотоэффекта.
4. Как объяснить законы внешнего фотоэффекта квантовой теорией?
5. Объясните устройство и принцип действия вакуумных элементов.
6. Как в работе осуществляется экспериментальная проверка 2-го закона фотоэффекта?
7. Укажите области техники, где используются приборы, принцип действия которых основан на явлении внешнего фотоэффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики т. 3. гл.1, гл. 9.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никеров В.А. Физика. Современный курс. Учебник. Для студентов технических вузов. Москва, «Дашков и К<sup>0</sup>», 2018 г., 452 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Некоторые физические постоянные

наименование	Обозначение и числовое значение
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Кг}$
Заряд электрона	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$
Постоянная закона Стефана -Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$
Постоянная закона смещения Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

### 2. Коэффициенты Стьюдента $t_{n\beta}$

Надежность $\beta$	0,5	0,7	0,9	0,95	0,99
Число измерений n					
4	0,77	1,24	2,13	2,77	4,63
5	0,74	1,24	2,01	2,57	4,03
6	0,73	1,24	1,94	2,45	3,72
7	0,72	1,14	1,89	2,36	3,54
8	0,71	1,13	1,86	2,31	3,36
9	0,71	1,12	1,83	2,26	3,25
10	0,70	1,10	1,81	2,23	3,17

3. Длины волн спектральных линий неона, гелия, ртути,  
наиболее характерных для видимой части спектра.

Ne

Линия	$\lambda$ , нм	Относительная яркость
1. Ярко-красная	640,2	10
2. Красно-оранжевая, левая из двух близких линий	614,3	10
3. Желтая	585,2	20
4. Светло-зеленая, первая заметная вправо от 4-ой	576,0	4
5. Зеленая, левая из двух одиноких линий	540,0	6
6. Зеленая, правая из двух одиноких линий	593,0	8
7. Сине-зеленая одинокая	484,9	8

He

Линия	$\lambda$ , нм	Относительная яркость
1. Красная	728,1	3
2. Красная	706,5	5
3. Красная	667,8	6
4. Желтая	587,6	10
5. Зеленая	501,6	10
6. Зеленая	492,2	4
7. Голубая	471,3	3
8. Синяя	438,8	3
9. Фиолетовая	402,6	5

Hg

Линия	$\lambda$ , нм	Относительная яркость
1. Желтая	579,1	10
2. Желтая	576,9	8
3. Зеленая	546,1	10
4. Голубая	491,6	1
5. Фиолетово-синяя	435,8	8
6. Фиолетовая	407,8	1
7. Фиолетовая	404,6	2