

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



**ФГБОУ ВПО
Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности**

Бахтин Н.А., Белоусов Г.Н., Осинцев А.М.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Кемерово 2014

УДК 53(075)
ББК 22.3я7
Б30

Рецензенты:

Гордиенко А. Б., доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической физики Кемеровского государственного университета;

Дырдин В. В., доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физики Кузбасского государственного технического университета

Бахтин Н. А.

Б30 Лабораторный практикум по физике. / Бахтин Н. А., Белоусов Г. Н., Осинцев А. М.; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2014. – 176 с.

ISBN 978-5-89289-814-0

Лабораторный практикум по курсу общей физики (механика, молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм, оптика, квантовая физика). Значительная часть описанных лабораторных установок представляет собой оригинальные разработки сотрудников кафедры физики КемТИПП. Практикум включает описание краткой теории метода измерения, а также пояснения к порядку проведения эксперимента и оформления протокола измерений.

Предназначен для самостоятельной работы студентов всех направлений и форм обучения.

УДК 53(075)
ББК 22.3я7
Б30

ISBN 978-5-89289-814-0

Охраняется законом об авторском праве, не может быть использовано любым незаконным способом без письменного договора

© КемТИПП, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

№ Лаб. раб.	Название	стр.
	<i>Введение</i>	5
1.	<i>Определение ускорения свободного падения</i>	12
2.	<i>Машина Атвуда</i>	17
3.	<i>Маятник Обербека</i>	20
4.	<i>Маятник Максвелла</i>	24
5.	<i>Определение ускорения свободного падения методом оборотного маятника</i>	27
6.	<i>Определение ускорения свободного падения с помощью автоматизированного оборотного маятника</i>	32
7.	<i>Определение моментов инерции тел с помощью крутильного маятника</i>	36
8.	<i>Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса</i>	40
9.	<i>Определение вязкости воды методом Пуазейля</i>	45
10.	<i>Измерение коэффициента лобового сопротивления шара</i>	48
11.	<i>Измерение скорости звука в воздухе</i>	53
12.	<i>Эффект Доплера</i>	56
13.	<i>Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана-Дезорма</i>	61
14.	<i>Определение вязкости воздуха методом Пуазейля</i>	64
15.	<i>Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца</i>	67
16.	<i>Распределение Максвелла</i>	72
17.	<i>Исследование электростатического поля</i>	78
18.	<i>Увеличение пределов измерения электроизмерительных приборов</i>	81
19.	<i>Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона</i>	85
20.	<i>Исследование электровакуумного триода</i>	90
21.	<i>Экспериментальное определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли</i>	93
22.	<i>Снятие петли гистерезиса ферромагнетика</i>	97
23.	<i>Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона</i>	103

№ Лаб. раб.	Название	стр.
24.	Определение удельного заряда электрона методом Буша.....	108
25.	Определение электродинамической постоянной.....	112
26.	Определение главного фокусного расстояния линз.....	116
27.	Изучение закона освещенности с помощью фотоэлемента.....	122
28.	Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля.....	124
29.	Зеркало Ллойда.....	127
30.	Определение радиуса кривизны сферической линзы с помощью колец Ньютона.....	131
31.	Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки.....	134
32.	Проверка закона Малюса.....	136
33.	Проверка закона Брюстера.....	138
34.	Определение постоянной Стефана-Больцмана по излучательной способности вольфрама.....	141
35.	Изучение фотоэлектрического эффекта.....	143
36.	Проверка соотношения неопределенностей для фотонов.....	146
37.	Изучение спектра излучения водорода.....	149
38.	Измерение интенсивности космического излучения.....	152
39.	Изучение зависимости сопротивления полупроводников от температуры.....	155
40.	Эффект Холла.....	160
41.	Исследование вольтамперной характеристики полупроводникового диода.....	163
42.	Исследование статических характеристик биполярного транзистора.....	167
43.	Туннельный диод.....	171
	Список рекомендуемой литературы.....	176

Введение

Целью каждой лабораторной работы по физике является сопоставление теории физического явления с экспериментом, а также непосредственное определение физических величин. Поэтому еще до выполнения лабораторной работы студент должен знать, что он ожидает получить, и как он собирается провести эксперимент. А после выполнения лабораторной работы объяснить, получил ли он то, что ожидал, и если не получил, то почему.

Методы обработки результатов измерений

Когда нам нужно измерить какую-нибудь величину, мы должны собрать установку, которая измерила бы то, что нужно, и не реагировала на то, что нас не интересует. Однако мы можем создать лишь такую установку, в которой посторонние влияния относительно мало искажают результат. Кроме того, измеряемая физическая величина входит в состав математической модели изучаемого явления, а любая математическая модель описывает явление лишь приближенно. Поэтому точного совпадения между результатом измерения и ожидаемым значением, предсказанным теорией, и не должно быть.

Итак, все измерения производятся с ограниченной точностью. Поэтому после каждого измерения необходимо указывать не только результат, но и погрешность, с которой этот результат получен.

Все возможные ошибки измерений по характеру своего происхождения можно разделить на три типа:

1. Грубые ошибки или промахи. Эти погрешности вызваны недостаточной внимательностью экспериментатора при считывании показаний с измерительных приборов, неправильной записью этих данных, ошибками при вычислениях или просто неумением производить измерения. Такие погрешности не подчиняются никакому закону. При обработке результатов такие данные должны быть отброшены. Производящий измерения должен проявлять больше внимания, тщательно проверять результаты измерений.

2. Систематические погрешности. Эти погрешности связаны со сдвигом измеренного значения относительно истинного. Возникают они из-за неисправности измерительных приборов или неточности метода измерения. Не существует универсальных правил, позволяющих найти систематическую погрешность данного измерения. Выявление, оценка и устранение этих погрешностей – дело опыта или интуиции экспериментатора. Систематическую погрешность, обусловленную измерительным прибором, можно уменьшить, используя более точный прибор. Погрешность, обусловленную методом измерения, можно уменьшить путем сравнения результатов измерения одной и той же ве-

личины, полученных принципиально разными методами. Систематические погрешности всегда односторонне влияют на результат измерений, только увеличивая или только уменьшая их.

3. Случайные погрешности. Случайные погрешности проявляются в разбросе данных при повторных измерениях, проведенных в одних и тех же условиях. Эти погрешности обусловлены факторами, изменяющимися от измерения к измерению: изменением напряжения в сети, изменением температуры воздуха, плохим освещением шкалы прибора, трением в осях приборов и т. д. Погрешности измерений такого рода подчиняются законам теории вероятностей, установленным для случайных явлений. На основе теории вероятностей были созданы методы обработки результатов измерений, которые дают возможность определить наиболее вероятные значения измеряемых величин, а также возможные отклонения от этих значений.

Следует помнить, что использование теории случайных погрешностей оправдано лишь в том случае, когда повторные измерения дают результаты, заметно отличающиеся друг от друга. Обычно в лабораторной практике чувствительности измерительных приборов не всегда хватает для обнаружения случайной погрешности. Кроме того, систематические погрешности приборов, как правило, велики по сравнению со случайными погрешностями. Если же случайная погрешность в большей степени влияет на конечный результат, чем систематическая, то ее можно уменьшить многократным повторением измерений.

Некоторые понятия метрологии

Когда мы собираемся что-то измерить, то мы внедряемся в область **метрологии** – науки об измерениях физических величин и о способах обеспечения единства и требуемой точности этих измерений. И не только этим занимается метрология. Существует еще законодательная метрология, которая разрабатывает правила и требует неукоснительного их соблюдения. Когда вы придете на свое производство, то будете постоянно находиться под контролем метрологических служб.

Итак, мы внедряемся в область метрологии, где существуют свои законы и понятия.

Физическая величина – это свойство, в качественном отношении общее многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Примеры: масса, длина, температура, напряженность электрического поля, период колебаний и др.

Конкретные проявления одной и той же физической величины называются **однородными величинами**. Например, ваш рост и расстояние от Земли до Луны однородные физические величины.

Однородные физические величины отличаются друг от друга размером. **Размер физической величины** – это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина».

Под **единицей физической величины** понимают физическую величину, фиксированную по размеру и принятую в качестве основы для количественной оценки конкретных физических величин (метр, миля, ангстрем, фут, дюйм).

Размер физической величины не зависит от выбранной единицы, он остается неизменным при использовании различных единиц.

Основные единицы системы СИ

1. **Метр** (м) – единица длины. Метр – длина, равная расстоянию, проходимому электромагнитным излучением за время, равное $1/c$ (где c – скорость света в вакууме, равная 299 792 458 м/с).
2. **Килограмм** (кг) – единица массы. Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.
3. **Секунда** (с) – единица времени. Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 ($^{133}_{55}\text{Cs}$).
4. **Ампер** (А) – единица силы тока. Ампер равен силе не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на участке проводника длиной в 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.
5. **Кельвин** (К) – единица термодинамической температуры. Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. В Кельвинах выражается также интервал или разность температур.
6. **Моль** (моль) – единица количества вещества. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде – 12 массой 0,012 кг.
7. **Кандела** (кд) – единица силы света. Кандела равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600\,000$ м² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па.

Дополнительные единицы

Радян (рад) – единица плоского угла. Радян равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Стерadian (ср) – единица телесного угла. Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Методы обработки результатов непосредственных измерений

К непосредственным измерениям относятся те измерения, при которых искомая величина A может быть определена по показаниям приборов. Эти измерения сводятся к отсчету по шкале приборов. Примерами непосредственных измерений могут служить определение длины штангенциркулем или микрометром, измерение силы тока амперметром, измерение промежутков времени секундомером и т. д.

Пусть в одних и тех же условиях проделано N измерений некоторой физической величины, истинное значение которой x :

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N.$$

Задача заключается в том, чтобы определить значение этой величины x с наименьшей погрешностью.

Наиболее близким к истинному значению измеряемой величины является среднее арифметическое, т. е.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (1)$$

Ошибкой называется разность между измеренным и истинным значением измеряемой величины

$$\Delta y_i = x_i - x. \quad (2)$$

Точное вычисление ошибок Δy_i невозможно, так как истинное значение измеряемой величины x неизвестно.

Введем понятие **отклонения результатов отдельных измерений от среднего значения \bar{x}**

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (3)$$

Эти отклонения удовлетворяют тождеству

$$\sum \Delta x_i = 0, \quad (4)$$

которое непосредственно следует из определения среднего арифметического \bar{x} .

Для ошибок Δy_i подобного равенства нет, так как неизвестно истинное значение величины x . Однако если серию из N измерений повторять многократно, устремив число повторений к бесконечности, то можно утверждать, что математическое ожидание (иначе говоря, среднее в этих бесконечно повторяемых сериях по N опытов) указанной суммы будет равно нулю, т. е.

$$\sum \Delta y_i = 0. \quad (5)$$

В этом проявляется случайный характер ошибок.

Преобразуем выражения (2) и (3), вычтя из (2) выражение (3).

$$\Delta y_i - \Delta x_i = \bar{x} - x. \quad (6)$$

Обозначим через S_N разность

$$S_N = \bar{x} - x. \quad (7)$$

S_N – является *средней квадратичной ошибкой среднего результата*.

Вычисление S_N и является главной целью обработки экспериментальных результатов.

Вычтем из уравнения (6) уравнение (7) и перепишем в виде:

$$\Delta y_i = \Delta x_i + S_N. \quad (8)$$

Число уравнений вида (8) равно числу измерений, т. е. N . Возведем все уравнения вида (8) в квадрат, просуммируем по всем i и затем, имея в виду (4), получим:

$$\sum \Delta y_i^2 = \sum \Delta x_i^2 + NS_N^2. \quad (9)$$

Далее преобразуем выражение (7):

$$S_N = \bar{x} - x = \frac{\sum x_i}{N} - x = \frac{\sum (x_i - x)}{N} = \frac{\sum \Delta y_i}{N}, \text{ или} \\ NS_N = \sum \Delta y_i. \quad (10)$$

Возведем уравнение (10) в квадрат:

$$N^2 S_N^2 = \sum \Delta y_i^2 + 2 \sum \sum \Delta y_i \Delta y_j.$$

Если рассматриваемую серию из N измерений повторять неограниченно, то двойная сумма с равной вероятностью будет принимать как положительные, так и отрицательные значения. Ее математическое ожидание будет равно нулю, поэтому

$$N^2 S_N^2 = \sum \Delta y_i^2. \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (9) и (11) позволяет исключить неизвестную сумму $\sum \Delta y_i^2$, откуда получим $S_N^2 = \frac{\sum \Delta x_i^2}{N^2 - N}$, или окончательно

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{N(N-1)}}. \quad (12)$$

В последнюю формулу входят только известные величины.

Окончательный результат принято записывать в виде: $x = \bar{x} \pm S_N$.

Порядок обработки результатов прямых измерений

1. Результаты каждого измерения x_i заносятся в заготовленную заранее таблицу.

2. Вычисляется среднее значение \bar{x} по формуле (1).
3. Вычисляются отклонения результатов отдельных измерений от среднего значения по формуле (3).
4. Вычисляется S_N по формуле (12).
5. Окончательный результат записывается в виде $x = \bar{x} \pm S_N$.
6. Оценивается относительная погрешность измерений $\varepsilon = \frac{S_N}{\bar{x}} \cdot 100\%$.

Методы обработки результатов косвенных измерений

Значение большинства физических величин определяется косвенными методами. Вначале производится непосредственное измерение одной или нескольких физических величин t , количественно связанных с определяемой величиной y уравнением:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (13)$$

Например, мы можем оценить высоту здания, непосредственно не измеряя его рулеткой, а сбрасывая с крыши камешки и измеряя время их падения. Высота связана с временем падения известной формулой $H = gt^2/2$, которая играет роль функции (13).

Очевидно, что в данном случае погрешность определяемой величины H зависит от погрешности измерения t .

При обработке результатов предлагается следующий порядок действий:

1. Производим несколько измерений t_i и находим среднее значение \bar{t} .
2. Рассчитываем среднее значение H при значении \bar{t} : $\bar{H} = g\bar{t}^2/2$.
2. Логарифмируем последнюю формулу: $\ln \bar{H} = \ln g + 2 \ln \bar{t} - \ln 2$.
3. Полученное выражение дифференцируем по \bar{t} : $\frac{dH}{\bar{H}} = \frac{2dt}{\bar{t}}$.
4. В полученном выражении дифференциалы поменяем на приборные погрешности и все члены в правой части уравнения возьмем с одним знаком «плюс». Величина $\varepsilon = \Delta \bar{H} / \bar{H}$ – относительная погрешность измерений.
5. Окончательный результат записывается в виде:

$$H = \bar{H} \pm \Delta \bar{H} = \bar{H} \pm \varepsilon \bar{H}.$$

Систематическая погрешность

При не высокой точности измерительных приборов случайными погрешностями можно пренебречь по сравнению с погрешностями, вносимыми измерительными приборами. В этом случае для получения результата достаточно проведения одной, двух серий измерений.

Погрешность в этом случае может быть оценена с помощью систематической погрешности, которая равна максимально возможной погрешности используемых в работе приборов. Появление такой погрешности маловероятно, однако экспериментатор по систематическим погрешностям может оценить качество проведенных измерений.

Для оценки систематической погрешности может быть предложен тот же порядок, что и порядок при косвенных измерениях.

Некоторые правила приближенных вычислений

Математические операции по обработке результатов измерений не могут их сделать более точными, чем позволяют их сделать измерительные приборы.

При определении численного значения величины ошибки следует различать два случая:

1. Существуют приближенные величины, значения которых могут быть вычислены с любой наперед заданной точностью. К таким величинам относятся, например, π , e , логарифмы чисел. К другим величинам относятся, например, физические константы, для которых «точные» табличные значения установлены соответствующими соглашениями. В качестве примера можно привести: c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка. В этом случае при расчетах за истинное значение величины принимается ее табличное значение, взятое с точностью, которую мы обеспечиваем в нашей лабораторной работе.

2. Результаты измерений, ошибки которых нам заранее неизвестны. Их погрешности находятся по следующим правилам. Абсолютная погрешность числа не должна превышать единицу последнего разряда в числе.

Контрольные вопросы

1. Назовите виды погрешностей, которые возникают при экспериментальном определении физических величин.
2. Дайте определение понятий: физическая величина, единица измерения физической величины.
3. Назовите основные единицы системы СИ.
4. Дайте определение понятий: радиан,стерадиан.
5. Дайте определение следующих понятий:
 - а) среднее арифметическое результатов измерений;
 - б) средняя квадратичная погрешность отдельного измерения;
 - в) средняя квадратичная погрешность среднего результата.
6. Опишите порядок обработки результатов при прямых измерениях.
7. Какие погрешности называются косвенными?

8. Расскажите порядок обработки экспериментальных результатов при косвенных измерениях.
9. Расскажите порядок оценки систематической погрешности.
10. Какая погрешность называется абсолютной?
11. Как оценить относительную погрешность?
12. В какой форме записывается результат после статистической обработки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение ускорения свободного падения

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость времени падения тела от высоты. По экспериментальным данным найти ускорение свободного падения в данном районе.

Краткая теория

На все тела, находящиеся в окрестности Земли действует **сила тяжести**

$$P = mg. \quad (1)$$

Если на тело не действуют другие силы, то оно будет падать с ускорением свободного падения g . Значение величины g одинаково для всех тел в данном месте.

Ускорение свободного падения g изменяется вблизи поверхности Земли в пределах от $9,780 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,832 \text{ м/с}^2$ на полюсах. Это обусловлено двумя факторами:

- 1) суточным вращением Земли,
- 2) сплюснутостью Земли у полюсов.

Планета Земля по форме является геоидом, но в первом приближении её можно считать эллипсоидом с экваториальным радиусом $R_e = 6378100 \text{ м}$ и полярным радиусом $R_p = 6356800 \text{ м}$ (рис. 1). Расстояние от центра Земли до некоторой точки на поверхности (т. н. радиус эллипсоида) можно вычислить по следующей формуле:

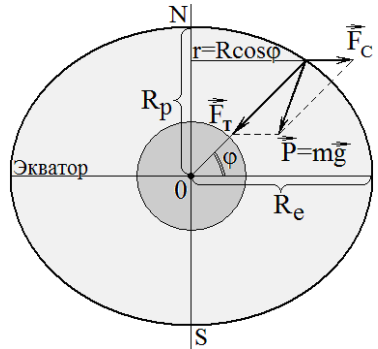


Рис. 1.

$$R_\varphi = \frac{R_e R_p}{\sqrt{R_e^2 \sin^2 \varphi + R_p^2 \cos^2 \varphi}}; \quad (2)$$

где φ – географическая широта данной местности, которую необходимо уточнить у преподавателя.

Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси, то сила тяжести совпала бы по величине и направлению с **силой тяготения** F_T , определяемой законом всемирного тяготения:

$$F_T = \gamma \frac{mM_E}{(R_\varphi + h)^2}. \quad (3)$$

где $\gamma = 6,6745 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ – гравитационная постоянная; m – масса тела; $M_E = 5,9736 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ – масса Земли; R_φ – радиус Земли на данной широте, определяемый по формуле (2); h – высота тяготеющего тела над поверхностью, которой следует считать средний уровень моря. Высоту уточнить у преподавателя.

Из-за вращения Земли сила тяжести на экваторе и на полюсах отличается на 0,3%. Механизм воздействия вращения на силу тяжести представлен на рис. 1. Т. к. Земля не является инерциальной системой отсчета, то на всякое покоящееся на ее поверхности тело действует центробежная сила инерции F_C , равная по величине

$$F_C = m\omega^2 r = m\omega^2 R_\varphi \cos\varphi, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли, которую можно определить по следующей формуле $\omega = 2\pi/T$, где T – период вращения Земли.

Из рис. 1 видно, что сила тяжести, действующая на тело, равна векторной сумме двух сил: центробежной силы и силы всемирного тяготения, действующей по направлению к центру Земли:

$$\vec{P} = \vec{F}_T + \vec{F}_C. \quad (5)$$

Очевидно, что направление силы тяжести совпадает с направлением к центру Земли только на полюсах и на экваторе, на других широтах оно отклоняется от этого направления.

Вес тела – это сила, с которой тело действует на опору или подвес. То есть вес тела приложен не к телу, а к опоре. Напомним, что сила тяжести приложена к самому телу. Вес тела и сила тяжести приложены, таким образом, к разным предметам. Вес тела численно равен силе тяжести только в том случае, когда опора или подвес неподвижны относительно Земли или движутся прямолинейно и равномерно.

Если опора будет свободно падать вниз с ускорением g , то тело не будет действовать на нее. Опора с телом не взаимодействует. Вес тела будет равен нулю. Тело в этом случае находится в состоянии невесомости.

Из рис. 1 видно, что модуль результирующей силы P равен длине малой диагонали параллелограмма. Учитывая, что модули соответствующих сил определены выражениями (3) и (4) и сокращая в выражении (5) массу тела m для ускорения свободного падения можно получить следующую формулу:

$$g = \sqrt{\left(\frac{\gamma M_E}{(R_\varphi + h)^2}\right)^2 + \left(\omega^2 (R_\varphi + h) \cos \varphi\right)^2} - 2 \frac{\gamma M_E \omega^2 \cos^2 \varphi}{R_\varphi + h}; \quad (6)$$

Так же ускорение свободного падения может быть вычислено (в м/с²) по эмпирической формуле:

$$g = 9,780327(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} h \quad (7)$$

где h – высота над уровнем моря в метрах, φ – географическая широта. Эта формула применима лишь в ограниченном диапазоне высот от 0 до нескольких десятков километров, где убывание ускорения свободного падения с высотой можно считать линейным (на самом же деле оно убывает квадратично).

Стандартное («нормальное») значение, принятое при построении систем единиц, $g = 9,80665$ м/с², а в технических расчётах обычно принимают $g = 9,81$ м/с². Стандартное значение g было определено как «среднее» в каком-то смысле ускорение свободного падения на Земле, примерно равно ускорению свободного падения на широте 45,5° на уровне моря.

Описание установки

Установка (рис. 2) состоит из штанги (Ш), с нанесенной на ней шкалой, по которой может перемещаться кронштейн (Кр) с зажимом (З) или электромагнитом (Э), который удерживает тело (Т), фиксируемого на нужной высоте H винтом (В), цифрового электронного секундомера (С), управление которым осуществляется с помощью кнопок (K_1 и K_2).

Устанавливая кронштейн на различных высотах, можно экспериментально исследовать зависимость времени падения тела (T) от высоты.

При нажатии кнопки включается электронная схема, которая устанавливает показания секундомера на «ноль» и подключает электромагнит к цепи питания. Если теперь, не убирая пальца с кнопки, поднести к электромагниту небольшое тело из стали (гайку, болт), то оно притянется к нему.

Если затем кнопку отпустить, то секундомер будет запущен, электромагнит отключен от источника питания, и тело начнет падать. В момент удара о стол секундомер прекратит отсчет времени. На шкале

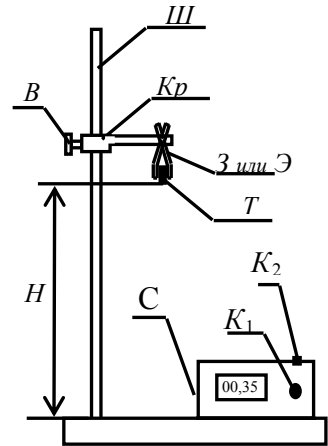


рис. 2

секундомера будет зафиксировано время падения тела с высоты H . Установившаяся электромагнит на различных отметках на штанге, можно экспериментально исследовать зависимость времени падения тела от высоты.

Экспериментальная часть

1. Заготовить таблицу.
2. Включить установку в сеть.
3. Установить электромагнит на высоте 0,4 м. Высота измеряется от поверхности стола до нижней части электромагнита. Зафиксировать электромагнит винтовым зажимом.

№ п/п	H (м)	t (с)	\bar{t}_* (с)	\bar{t}_*^2 (с ²)	$g = 2H/\bar{t}_*^2$ (м/с ²)	$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} + 2\frac{\Delta t}{\bar{t}_*}$	$\Delta g = \bar{g} \cdot \varepsilon$ (м/с ²)
1							
2							
3							
⋮		⋮		⋮		⋮	⋮
6							
средние значения							

4. Занести установленную высоту H_i в таблицу.
5. Взять имеющееся тело, поднести его к нижней части электромагнита и нажать на секундомере кнопку K . Тело должно притянуться к электромагниту.
6. Отпустить кнопку. Тело начнет падать, а секундомер отсчитывать время. При ударе о стол секундомер фиксирует время падения.
7. Показания секундомера занести в таблицу.
8. Произвести по три отсчета времени на каждой высоте закрепления электромагнита. Электромагнит фиксировать на штанге в пределах 0,4÷1 м.

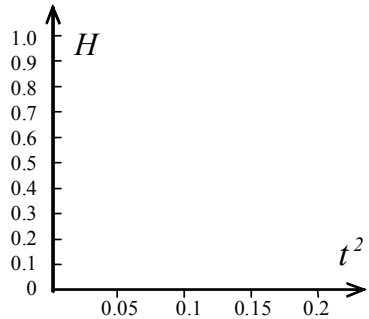
Обработка экспериментальных результатов

1. Найти среднее время \bar{t} для каждой высоты. Далее необходимо учесть *постоянную времени задержки* системы автоматической остановки секундомера $\tau = 0,01$ с, отняв её от \bar{t} . Занести в таблицу значение $\bar{t}_* = \bar{t} - \tau$.
2. Вычислить g и ε для каждой высоты. Результат занести в таблицу.

3. Найти средние значения \bar{g} и $\bar{\varepsilon}$ и занести в последнюю строку таблицы. В предлагаемой установке погрешность в измерении высоты составляет $\Delta H = 0,5$ см, а времени $\Delta t = 0,01$ с.
4. Вычислить Δg .
5. Записать результат в последнюю колонку таблицы.
6. Вычислить значения ускорения g по формулам (6) и (7).

Построение графика

Построить график зависимости $H = gt^2/2$ по экспериментальным данным. Для удобства предлагается построить зависимость H от \bar{t}_*^2 . Ориентировочный вид системы координат для графика приведен на рисунке. Причем соотношение единичных отрезков на горизонтальной и вертикальной оси целесообразно выбрать как 5:1. Линию провести таким образом, чтобы она была равноудалена от всех экспериментальных точек и проходила через начало координат (т. н. наилучшая прямая).



Тангенс угла наклона линии равен $g/2$. Найти значение g из графика и сравнить со значениями, полученными ранее. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое траектория движения, путь, перемещение?
2. Что такое скорость? Как определяется средняя и мгновенная скорость?
3. Что такое ускорение? Что определяет тангенциальное и нормальное ускорение? Укажите направление векторов \vec{a}_τ , \vec{a}_n , \vec{a} .
4. Законы Ньютона.
5. Закон всемирного тяготения в векторной форме.
6. Центробежная сила инерции.
7. Какие силы действуют на тела, находящиеся на поверхности Земли, и что такое сила тяжести, действующая на тело?
8. От каких факторов зависит ускорение свободного падения g ?
9. Вес тела. Невесомость.
10. Зависит ли время падения тела от его массы?
11. Можно ли у поверхности земли создать состояние невесомости и если да, то каким образом?
12. Единицы измерения скорости, ускорения, массы, силы, времени, расстояния.
13. Какие виды погрешности вы знаете? Как они определяются?

14. Выведите формулу для оценки погрешности в данной работе.
 15. Получили ли Вы в данной работе ожидаемый результат? Если нет, то почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Машина Атвуда

Цель работы: изучить законы прямолинейного движения тел.

Устройство и принцип работы

Общий вид установки представлен на рис. 1. На вертикальной стойке 1 основания 2 расположены три кронштейна: нижний 3, средний 4 и верхний 5. На верхнем кронштейне 5 крепится блок с узлом подшипника качения, через который перекинута капроновая нить с грузами, одинаковой массы. На этом кронштейне находится электромагнит 7, который с помощью фрикциона, при подаче на него напряжения, удерживает систему с грузами в неподвижном состоянии.

На среднем кронштейне крепится фотодатчик 8, который выдает электрический сигнал секундомеру для окончания отсчета времени. Средний кронштейн имеет индекс, положение которого совпадает с оптической осью фотодатчика.

Нижний кронштейн имеет резиновый амортизатор, о который ударяется груз при его остановке.

Средний и нижний кронштейн имеет возможность свободного перемещения и фиксации на вертикальной стойке по всей его длине.

Начальное положение определяют визуально по нижнему срезу груза, конечное по индексу среднего кронштейна.

Миллисекундомер 10 представляет собой самостоятельный прибор с цифровой индикацией времени. На вертикальной стойке 1 установлена миллиметровая линейка 9, по которой определяют начальное и конечное положение грузов, а, следовательно, и пройденный путь.

Через блок 11 перекинута нить 6 с грузами. Когда масса грузов одинакова, система находится в состоянии безразличного равновесия или грузы движутся равномерно и прямолинейно, если их толкнуть. Если на один из грузов положить перегрузок массы m , то система начинает

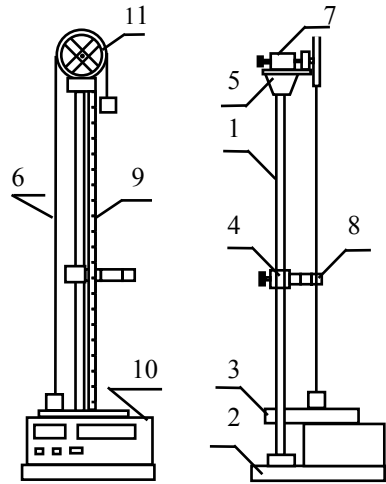


Рис. 1

двигаться равноускоренно. Установка укомплектована тремя перегрузками.

Краткая теория

Предположим, что блок и нити невесомы, нить нерастяжима, сила трения мала. В этом случае сила натяжения будет одинакова по обеим сторонам блока. Силы, действующие на грузы, показаны на рис. 2. Запишем второй закон Ньютона для левого груза

$$(M + m)g - T = (M + m)a, \quad (1)$$

где M – масса основного груза; m – масса перегрузки; a – ускорение груза; g – ускорение свободного падения; T – сила натяжения нити.

Для правого груза, который не имеет перегрузки, второй закон Ньютона записывается так:

$$T - Mg = Ma. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), найдем значение ускорения грузов для этого идеального случая

$$a_{\text{т}} = g \frac{m}{2M + m}, \quad (3)$$

где $M = 80 \pm 0,5$ г.

Для экспериментального определения ускорения воспользуемся известной формулой:

$$S = at^2/2, \quad (4)$$

где S – путь, пройденный грузами; t – время движения грузов.

Измерив, путь, пройденный телом, и время его движения, можно найти ускорение движения грузиков. Данная установка позволяет производить такие измерения с большой точностью.

Предостережение! Если прибор включен, а кнопка "Пуск" не нажата, не крутите блок. Тормоз удерживает блок, и его вращение может повредить прибор. Вращать блок только при нажатой кнопке "Пуск" или при выключенном приборе.

Порядок выполнения работы

1. Осторожно надеть нить с двумя грузами в канавку блока и убедиться, что система находится в состоянии безразличного равновесия.
2. Четырьмя винтами основания добиться того, чтобы правый груз при движении проходил точно посередине рабочего окна фотодатчика, иначе груз во время эксперимента может разбить фотодатчик.
3. Включить в сеть шнур питания прибора и нажать кнопку «сеть», при этом должна загореться индикаторная лампочка.

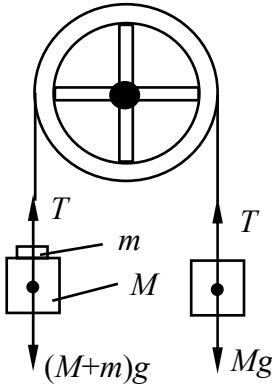


Рис. 2

4. Осторожно положить на правый груз первый перегрузок.
5. Нажать кнопку «пуск» и, не отпуская ее, перевести правый груз в самое верхнее положение. Левый груз при этом будет находиться на основании прибора.
6. Нажать и отпустить кнопку «сброс». Во всех разрядах секундомера должны появиться нули.
7. Нажать кнопку «пуск» и не отпускать ее, пока правый груз не ударится об основание.
8. Записать показания секундомера и пройденный грузами путь в таблицу. Пройденный путь определяется по линейке как расстояние от верхнего положения нижней части правого груза до индекса кронштейна с фотодатчиком. Опыт с этим перегрузком провести три раза.
9. Установить еще один перегрузок, после чего повторить пункты с 5 по 10.

Таблица 1

S (м)	m (кг)	t (с)	\bar{t} (с)	$a = 2S/\bar{t}^2$ (м/с ²)	$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} + 2\frac{\Delta t}{\bar{t}}$	$\Delta a = \varepsilon \cdot a$ (м/с ²)	a_{τ} (м/с ²)

10. Добавить третий перегрузок и снова повторить пункты с 5 по 10. Обработать результаты измерений и заполнить все графы таблицы.
11. Вычислить теоретическое значение ускорения грузов по формуле (3) и сравнить с экспериментальным значением. Сделать выводы.
12. Вывести самостоятельно формулы для расчета абсолютной и относительной погрешности измерений.

Контрольные вопросы

1. Какое движение называется равномерным? Запишите уравнение равномерного движения.
2. Какое движение называется равноускоренным?
3. Напишите формулы для пути, скорости и ускорения при равноускоренном движении.
4. Как зависит ускорение свободного падения тела в вакууме от его массы?
5. Нарисуйте блок с перекинутой через него нитью с грузами и расставьте силы, действующие на грузы.
6. Напишите уравнения движения грузов для случая, когда массой блока и нити можно пренебречь.

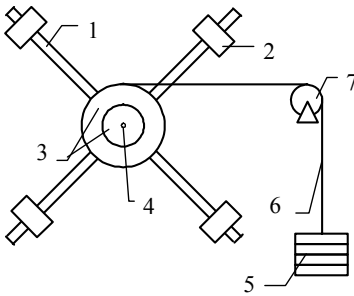
7. Найдите ускорение движения грузов.
8. Какие виды погрешностей при измерениях вы знаете?
9. Выведите формулы для вычисления абсолютной и относительной погрешностей.
10. Сравните экспериментальные и теоретические результаты. Сделайте выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Маятник Обербека

Цель работы: изучить основные характеристики вращательного движения, экспериментальным путем определить значение момента инерции крестовины маятника Обербека и сравнить его с расчетным.

Описание установки



Маятник Обербека представляет собой систему, состоящую из двух стержней (1), на концах которых находятся грузы одинаковой массы (2), двух шкивов (3), закрепленных на оси (4), которая вращается в подшипниках. Маятник приводится в движение грузами (5) закрепленными на нити (6), перекинутой через блок (7) и намотанной на один из шкивов.

Маятник Обербека имеет простую конфигурацию и его момент инерции легко найти расчетным путем.

Оба стержня (1), используемые в установке, в первом приближении, можно считать тонкими, поэтому:

$$I_{rod} = 2 \frac{m_{rod} l_{rod}^2}{12} = \frac{m_{rod} l_{rod}^2}{6}.$$

Момент инерции всех четырех грузов на концах стержней равен

$$I_w = 4m_w r_w^2,$$

где $r_w = 0,2 \text{ м}$ – это расстояние от грузов (2) до оси вращения, т. к. в первом приближении их можно считать материальными точками. Момен- тами инерции оси и шкивов можно пренебречь, т. к. их значение доста- точно мало по сравнению с моментами инерции грузов и стержней.

Таким образом, общий момент инерции крестовины маятника Обер- бека может быть рассчитан по формуле:

$$I_{theor} = \frac{m_{rod} l_{rod}^2}{6} + 4m_w r_w^2 \quad (1)$$

Задание

Вычислить значение момента инерции крестовины маятника Обербека по формуле (1). Это значение является величиной, которую вы ожидаете получить при выполнении лабораторной работы.

Параметры узлов установки:

$m_b = 0,04$ кг – масса болта с шайбой; $D_{b1} = 0,034$ м – диаметр большого шкива;
 $m_{rod} = 0,181$ кг – масса стержня; $D_{b2} = 0,017$ м – диаметр малого шкива;
 $l_{rod} = 0,465$ м – длина стержня; $m_w = 0,123$ кг – масса грузов на стержнях.

Вывод расчетной формулы

Пренебрегая трением, можно записать закон сохранения энергии:

$$mgH = \frac{I\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса болта с шайбой и грузов на нем, I – момент инерции крестовины маятника, g – ускорение свободного падения, ω – угловая скорость вращения крестовины, v – линейная скорость груза m , H – путь, пройденный грузом за время t .

Если нить нерастяжима и нет проскальзывания между нитью и шкивом, то угловая скорость

$$\omega = v/r = 2v/D, \quad (3)$$

где D – диаметр шкива, на который наматывалась нить, поэтому

$$mgH = \frac{2Iv^2}{D^2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (4)$$

откуда

$$I = \frac{mD^2}{4} \left(\frac{2gH}{v^2} - 1 \right). \quad (5)$$

Введем в формулу (5) непосредственно измеряемые величины. Т. к. движение маятника равноускоренное с нулевой начальной скоростью, то

$$H = at^2/2, \text{ а } v = at, \text{ откуда следует, что}$$

$$v = 2H/t. \quad (6)$$

Подставив (6) в формулу (5), получим

$$I = \frac{mD^2}{4} \cdot \left(\frac{gt^2}{2H} - 1 \right). \quad (7)$$

Для нашей установки выполняется неравенство $\frac{gt^2}{2H} \gg 1$, поэтому расчетная формула примет окончательный вид:

$$I = \frac{mD^2}{4} \cdot \frac{gt^2}{2H}. \quad (8)$$

Для удобства расчетов приведем формулу (8) к виду

$$I = k \frac{mt^2}{H}, \quad \text{где } k = \frac{D^2 g}{8}. \quad (9)$$

Экспериментальная часть

1. Для обработки экспериментальных результатов заготовьте таблицу.

Таблица 1

H (м)	m (кг)	t (с)	\bar{t} (с)	I (кг·м ²)	\bar{I} (кг·м ²)	ε	$\Delta \bar{I}$ (кг·м ²)

2. Необходимо провести опыты с тремя грузами m . Значения масс грузов согласуйте с преподавателем.
3. Высоту падения грузиков H в опытах лучше не изменять. Согласуйте с преподавателем высоту падения грузиков и попросите инструмент для измерения этой высоты.
4. Произведите по три измерения времени падения каждого грузика и занесите результаты в таблицу.
5. Рассчитайте экспериментальное значение I по формуле (9) с каждым грузом.
6. Найдите среднее значение \bar{I} и занесите в таблицу
7. Сравните значения \bar{I} и I_{theor} и проанализируйте причину расхождений, если они имеются. Сделайте выводы.

Оценка погрешности метода

1. Прологарифмируем выражение (8)

$$\ln I = \ln m + 2 \ln D + 2 \ln t + \ln g - \ln 8 - \ln H. \quad (10)$$

2. Возьмем дифференциал от формулы (10)

$$\frac{dI}{I} = \frac{dm}{m} + 2 \frac{dD}{D} + 2 \frac{dt}{t} - \frac{dH}{H}. \quad (11)$$

3. Заменяем в формуле (11) минусы на плюсы, а дифференциалы на приращения. Приращениями являются приборные погрешности. Получим

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta D}{D} + 2 \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta H}{H}. \quad (12)$$

4. Приборные погрешности имеют следующие значения:

- в измерении массы $\Delta m = 0,005$ кг;
- диаметра шкива $\Delta D = 10^{-3}$ м;
- времени $\Delta t = 0,01$ с;
- высоты $\Delta H = 0,005$ м.

5. Абсолютную погрешность вычислить по формуле:

$$\Delta I = \varepsilon I. \quad (13)$$

6. Ответ записать в виде

$$I \pm \Delta I. \quad (14)$$

Контрольные вопросы

1. Дать определение угловой скорости, углового ускорения и связь их с линейными характеристиками.
2. Чему равен момент инерции точки относительно некоторой оси?
3. Чему равен момент инерции тела относительно некоторой оси? Каков физический смысл момента инерции?
4. Чему равен момент инерции тонкого кольца относительно оси симметрии?
5. Выведите формулу для вычисления момента инерции сплошного диска относительно оси симметрии.
6. Выведите формулу для вычисления момента инерции тонкого однородного стержня относительно оси, проходящей через середину и перпендикулярной стержню.
7. Чему равен момент силы относительно некоторой оси? Как направлен вектор момента силы?
8. Что такое плечо силы?
9. Выведите основной закон динамики вращательного движения.
10. Сформулируйте теорему Штейнера.
11. Найдите момент инерции тонкого стержня относительно оси, проходящей через его конец и перпендикулярной стержню.
12. Найдите момент инерции сплошного диска относительно оси, отстоящей от оси симметрии на расстоянии $2R$ и параллельной ей.
13. Выведите формулу для расчета относительной погрешности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Маятник Максвелла

Цель работы: изучить основные характеристики и особенности вращательного движения; экспериментальным путём определить момент инерции маятника Максвелла и сравнить с расчетным значением.

Устройство и принцип работы установки

Общий вид установки представлен на рис. 1. На вертикальной стойке основания 1 крепятся два кронштейна: верхний 2 и нижний 3. Верхний кронштейн снабжен винтом 4 для крепления и регулировки бифилярного подвеса 5. Маятник представляет собой диск 6, закрепленный на оси 7, подвешенный на бифилярном подвесе. На диске крепятся сменные кольца 8. Маятник со сменными кольцами фиксируется в верхнем исходном положении с помощью электромагнита.

На вертикальной стойке нанесена миллиметровая шкала, по которой определяется ход маятника.

Фотодатчик 9 предназначен для подачи электрического сигнала на миллисекундомер 10 в момент пересечения его оптической оси непрозрачным предметом. Кронштейн 3 позволяет устанавливать фотодатчик в любом положении шкалы.

Принцип работы маятника Максвелла основан на том, что поднятый на высоту H он обладает потенциальной энергией mgH . После отключения электромагнита маятник начнёт раскручиваться, и его потенциальная энергия будет переходить в кинетическую энергию поступательного движения $mv^2/2$ и энергию вращательного движения $I\omega^2/2$. На основании закона сохранения механической энергии имеем:

$$mgH = \frac{I\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}. \quad (1)$$

где m – масса маятника, т. е. сумма масс диска, кольца и оси; H – путь, проходимый маятником; I – полный момент инерции маятника.

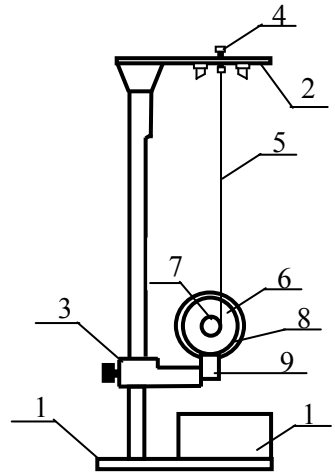


Рис. 1

Вывод расчетной формулы

Введем в формулу (1) непосредственно измеряемые величины, а именно H – высоту опускания груза, и t – время, за которое груз опустится. Т. к. движение маятника равноускоренное с нулевой начальной скоростью, то

$$H = at^2/2, \quad a = v = at,$$

откуда следует

$$v = 2H/t. \quad (2)$$

Кроме того, скорость движения маятника v связана с его угловой скоростью вращения ω соотношением $\omega = v/R_0$, где R_0 – радиус оси. Подставив (2) в формулу (1), с учетом последней формулы получим:

$$I = mR_0^2 \left(\frac{gt^2}{2H} - 1 \right). \quad (3)$$

Для нашей установки выполняется неравенство $\frac{gt^2}{2H} \gg 1$, поэтому расчетная формула примет окончательный вид:

$$I = mR_0^2 \cdot \frac{gt^2}{2H}. \quad (4)$$

Для удобства расчетов запишем формулу (4) в виде:

$$I = k \cdot m \cdot t^2, \quad \text{где } k = \frac{gR_0^2}{2H}. \quad (5)$$

Параметры установки:

$R_0 = 0,005$ м – радиус оси; $R_1 = R_d$ – внутренний радиус сменного кольца;
 $m_0 = 0,022$ кг – масса оси; $R_2 = 0,052$ м – внешний радиус кольца;
 $m_d = 0,15$ кг – масса диска; m_r – масса кольца (выгравирована на каждом
 $R_d = 0,045$ м – радиус диска; кольце).

Задание

Вычислить момент инерции маятника для трех разных колец по формуле:

$$I_{theor} = \frac{m_0 R_0^2}{2} + \frac{m_d R_d^2}{2} + m_r \frac{R_1^2 + R_2^2}{2}. \quad (6)$$

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу.
2. С помощью четырех винтов на основании прибора добиться того, чтобы диск маятника не ударял по кронштейну с фотодатчиком.
3. Включить в сеть шнур питания прибора. Нажать кнопку «сеть».

H (м)	m_r (кг)	t (с)	\bar{t} (с)	I (кг·м ²)	ε	ΔI (кг·м ²)

4. Вращая маятник, зафиксировать его в верхнем положении при помощи электромагнита. Внимательно следить за тем, чтобы нить навивалась на ось виток к витку. В зафиксированном положении нити не должны быть сильно натянуты, в этом случае маятник не отделится от магнита при нажатии кнопки «пуск».
5. Нажать кнопку «сброс» и убедиться, что во всех разрядах индикатора установились нули.
6. Нажать кнопку «пуск» на миллисекундомере.
7. Произвести отсчет времени и занести в таблицу.
8. Занести в таблицу высоту падения маятника.
9. С каждым сменным кольцом произвести не менее трех измерений (количество опытов согласовать с преподавателем).

Вычисление погрешности

1. Прологарифмируем выражение (4):

$$\ln I = \ln m + 2 \ln R_0 + 2 \ln t - \ln 2 - \ln H. \quad (7)$$

2. Возьмем дифференциал от формулы (7):

$$\frac{dI}{I} = \frac{dm}{m} + 2 \frac{dR_0}{R_0} + 2 \frac{dt}{t} - \frac{dH}{H}. \quad (8)$$

3. Заменяем в формуле (8) «-» на «+», а дифференциалы на приращения. Приращениями являются приборные погрешности. Получим:

$$\varepsilon = \frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta R_0}{R_0} + 2 \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta H}{H}. \quad (9)$$

4. При вычислении ε принять следующие погрешности:

- массы кольца $\Delta m = 0,001$ кг;
- времени $\Delta t = 0,01$ с;
- радиуса оси $\Delta R_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м;
- высоты $\Delta H = 0,001$ м.

5. Абсолютную погрешность вычислить по формуле:

$$\Delta I = \varepsilon I. \quad (10)$$

6. Результат записать в виде

$$I = \bar{I} \pm \Delta I. \quad (11)$$

7. Сравнить экспериментальное и теоретическое значение момента инерции маятника Максвелла и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Чему равен момент инерции точки относительно некоторой оси?
2. Чему равен момент инерции тела относительно некоторой оси?
3. Чему равен момент инерции тонкого кольца относительно оси симметрии?
4. Выведите формулу для вычисления момента инерции относительно оси симметрии.
5. Выведите формулу для вычисления момента инерции тонкого стержня относительно оси, проходящей через середину и перпендикулярной стержню.
6. Чему равен момент силы относительно некоторой оси?
7. Что такое плечо силы?
8. Выведите основной закон динамики вращательного движения.
9. Назовите основные кинематические характеристики вращающегося твердого тела. Какова связь между линейной и угловой скоростью? Между линейным и угловым ускорением?
10. Сформулируйте теорему Штейнера.
11. Найдите момент инерции тонкого стержня относительно оси, проходящей через его конец и перпендикулярной стержню.
12. Найдите момент инерции сплошного диска относительно оси, отстоящей от оси симметрии на расстоянии $2R$ и параллельной ей.
13. Выведите формулу для расчета относительной погрешности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Определение ускорения свободного падения методом обратного маятника

Цель работы: Изучить закономерности колебаний физического маятника, определить экспериментально ускорение свободного падения.

Краткая теория метода

Математический маятник – это идеализированная система, состоящая из невесомой и нерастяжимой нити, на которой подвешена масса, сосредоточенная в одной точке. Достаточно хорошим приближением к математическому маятнику может служить тяжелый шарик малого диаметра, подвешенный на тонкой жесткой длинной нити (рис. 1).

Отклонение маятника от положения равновесия будем характеризовать углом α , образованным нитью с вертикалью. При отклонении маятника от положения равновесия возникает вращательный момент M , равный по величине $mg \cdot l \sin \alpha$ (l – длина нити). Этот момент стремится вер-

нуть маятник к положению равновесия, т. е. аналогичен квазиупругой силе. Моменту M и угловому смещению α нужно приписывать разные знаки.

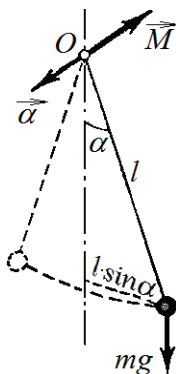


рис. 1

$$M = -mg \cdot l \sin \alpha. \quad (1)$$

Основной закон динамики вращательного движения имеет вид:

$$M = I\beta. \quad (2)$$

Момент инерции маятника $I = ml^2$.

Подставим выражения для моментов M и I в формулу (2):

$$-mgl \cdot \sin \alpha = ml^2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2}.$$

Преобразуем это уравнение, разделив почленно на ml^2 :

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{g}{l} \cdot \sin \alpha = 0.$$

Ограничимся рассмотрением малых колебаний. В этом случае можно считать $\sin \alpha \approx \alpha$. Введя, кроме того, обозначение $g/l = \omega_0^2$, приходим к уравнению вида

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = 0. \quad (3)$$

Его решение имеет вид:

$$\alpha = \alpha_0 \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi). \quad (4)$$

Следовательно, при малых колебаниях угловое отклонение математического маятника изменяется по времени по гармоническому закону. Угловая частота равна

$$\omega_0 = \sqrt{g/l}, \quad \text{а период } T = 2\pi\sqrt{l/g}, \quad (5)$$

т. е. период зависит только от длины математического маятника и ускорения свободного падения и не зависит от массы маятника.

Физический маятник – это твердое тело, свободно вращающееся вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр масс. (рис. 2)

Момент сил, приложенных к маятнику относительно его оси вращения, равен:

$$M = -mgl_0 \sin \alpha,$$

где m – масса физического маятника, l_0 – расстояние от оси вращения до центра масс маятника (OC). Знак «минус» означает, что момент M

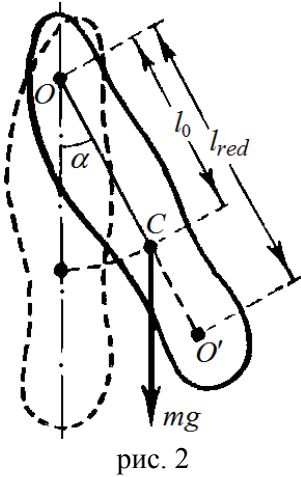


рис. 2

препятствует повороту на угол α . При малых углах поворота $\sin\alpha \approx \alpha$. Обозначив момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса через I , запишем основной закон динамики вращательного движения:

$$I \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl_0 \cdot \alpha \Rightarrow \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = 0.$$

Его решение аналогично формуле (4), где

$$\omega_0^2 = \frac{mgl_0}{I}. \quad (6)$$

При малых отклонениях от положения равновесия физический маятник совершает гармонические колебания. Частота колебаний зависит от массы маятника, момента инерции маятника относительно оси вращения и расстояния между осью вращения и центром инерции маятника. Период колебаний маятника определим из соотношения (6):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl_0}}. \quad (7)$$

Из сопоставления формул (5) и (7) видно, что математический маятник длиной

$$l_{red} = \frac{I}{ml_0}. \quad (8)$$

будет иметь такой же период колебаний, как и данный физический маятник. Величину l_{red} называют приведенной длиной физического маятника.

Приведенная длина физического маятника – это длина такого математического маятника, период колебания которого совпадает с периодом колебания данного физического маятника.

Точка на прямой, соединяющей точку подвеса с центром инерции, лежащая на расстоянии приведенной длины от оси вращения, называется **центром качания** физического маятника. Можно показать, что при подвесе маятника в центре качания, приведенная длина, а значит, период колебаний будут теми же, что и вначале. **Оборотным** называется такой маятник, у которого имеются две точки подвеса на противоположных сторонах, например параллельные друг другу, закрепленные вблизи концов линейного маятника опорные призмы, за которые он может быть поочередно подвешен.

Определение ускорения свободного падения с помощью обратного маятника основано на описанном выше свойстве, которое может быть иначе выражено следующим образом: *если период колебаний относительно обеих осей подвеса одинаков, то расстояние между осями равно приведенной длине маятника*. С этой целью используется линейный маятник, состоящий из стержня с размещенными на нем призмами (оси подвеса) и грузами. Вдоль стержня могут перемещаться и закрепляться либо грузы, либо опорные призмы. Перемещением грузов или призм добиваются того, чтобы при подвешивании маятника за любую из призм периоды колебаний были одинаковыми. Тогда расстояние между опорными ребрами призм будет равно l_{red} . Измерив период колебаний такого маятника, можно найти ускорение g :

$$g = \frac{4\pi^2 l_{red}}{T_{rev}^2}. \quad (9)$$

Описание установки

В данной работе используется маятник особой конструкции (рис. 3). Он состоит из стержня (C), двух чечевиц ($Ч_1$ и $Ч_2$), двух призм ($П_1$ и $П_2$), за которые подвешивают маятник. В процессе измерения положение чечевицы $Ч_2$ может меняться. Путем перемещения чечевицы $Ч_2$ можно добиться того, чтобы периоды колебаний маятника T_1 и T_2 относительно обеих призм совпадали. В этом случае расстояние между призмами будет равно приведенной длине физического маятника l_{red} , а период равен периоду колебания обратного маятника T_{rev} . Измерив T_{rev} и l_{red} , можно по формуле (9) найти ускорение свободного падения.

Однако добиться полного совпадения периодов колебаний путем последовательного перемещения призмы чрезвычайно трудно. Поэтому в работе используется следующий метод. Измеряют периоды колебаний T_1 и T_2 относительно обеих призм при различных положениях чечевицы $Ч_2$. Затем строят график в прямоугольной системе координат, по оси абсцисс которого откладывают положение чечевицы, а по оси ординат — T_1 и T_2 . В точке пересечения графиков периоды колебаний равны: $T_1 = T_2 = T_{rev}$. В этом случае расстояние между призмами равно приведенной длине физического маятника.

У маятника в данной лабораторной установке $l_{red} = 0,73$ м.

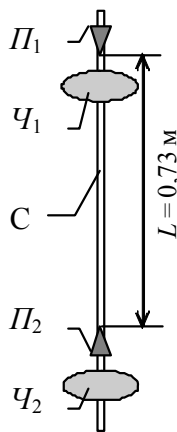


Рис. 3

Экспериментальная часть

1. Установить подвижную чечевицу в крайнее положение и зафиксировать ее стопорным устройством.
2. Подвесить маятник за призму P_1 . Отклонить маятник на небольшой угол порядка $5 \div 6^\circ$ и отпустить его, одновременно включив секундомер. Отсчитать двадцать полных колебаний и отключить секундомер. Показания секундомера, т. е. время t_1 , занести в таблицу.
3. Перевернуть маятник и подвесить за призму P_2 и вновь измерить время двадцати полных колебаний – это время t_2 . Результат занести в таблицу.

№ измерения	Положение чечевицы h (в делениях шкалы)	t_1 (с)	$T_1 = t_1/20$ (с)	t_2 (с)	$T_2 = t_2/20$ (с)
1	2				
2	4				
3	6				
4	8				
5	10				
6	12				
7	14				

4. Снять маятник, положить на стол, подвинуть чечевицу на одно или два деления по указанию преподавателя, зафиксировать ее стопорным устройством. Подвесить маятник и вновь произвести измерения t_1 и t_2 в порядке, указанном в пунктах 2 и 3.
5. Произвести измерения периодов колебаний на обеих призмах при всех положениях чечевицы h , указанных преподавателем.
6. Построить графики зависимостей $T_1(h)$ и $T_2(h)$ (значения T_1 и T_2 отмечать разными цветами, чтобы не было путаницы). Линии проводить равноудалено от соответствующих точек.
7. Найти точку пересечения графиков. Ордината этой точки и есть период колебаний обратного маятника T_{rev} .
8. Вычислить ускорение свободного падения по формуле (9) и сравнить со стандартным значением, сделать соответствующие выводы.

Оценка систематической погрешности

Оценим значение систематической погрешности. Для этого прологифмируем выражение (9):

$$\ln g = \ln(4\pi^2) + \ln l_{red} - 2 \ln T_{rev}.$$

Дифференцируем:

$$\frac{dg}{g} = \frac{dl_{red}}{l_{red}} - 2 \frac{dT_{rev}}{T_{rev}}.$$

Заменим дифференциалы на погрешности прямых измерений, а минус на плюс:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{red}}{l_{red}} + 2 \frac{\Delta T_{rev}}{T_{rev}}.$$

Погрешность в измерении l_{red} составляет $\Delta l_{red} = 5 \cdot 10^{-3}$ м, а в измерении времени $t = 0,01$ с.

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнение гармонического колебания.
2. Дайте определение частоты, циклической частоты, периода, амплитуды, элонгации, фазы гармонического колебания.
3. Найдите скорость точки при гармоническом колебании. Найдите ускорение колеблющейся точки.
4. Выведите дифференциальное уравнение гармонических колебаний для физического, математического и пружинного маятников.
5. Какому условию удовлетворяет сила, действующая на материальную точку, совершающую гармоническое колебание?
6. Какая сила называется квазиупругой? Чему равен период колебания точки массой m под действием квазиупругой силы?
7. Найдите выражение для кинетической и потенциальной энергии колеблющейся точки. Чему равна полная энергия?
8. Дайте определения математического и физического маятников. Чему равны периоды их колебаний?
9. Какой маятник называется обратным?
10. Что такое приведенная длина физического маятника? Чему она равна у математического маятника?
11. Как оценить систематическую погрешность измерений?
12. Для каких целей производится измерение времени двадцати колебаний, а не одного колебания или десяти?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Определение ускорения свободного падения с помощью автоматизированного обратного маятника

Цель работы: Изучить закономерности колебаний физического маятника, определить экспериментально ускорение свободного падения.

Описание установки

В данной работе используется маятник особой конструкции (рис. 1). Маятник состоит из стержня (C), двух призм ($П_1$ и $П_2$), за которые подвешивают маятник. В процессе измерения положение одной из призм ($П_2$) может изменяться. Путем перемещения призмы можно добиться того, чтобы периоды колебаний маятника T_1 и T_2 относительно обеих

призм совпадали. В этом случае расстояние между призмами будет равно приведенной длине физического маятника l_{red} , а период равен периоду колебания обратного маятника T_{rev} . Измерив T_{rev} и l_{red} , ускорение свободного падения можно определить по формуле (12).

Однако добиться полного совпадения периодов колебаний путем последовательного перемещения призмы чрезвычайно трудно. Поэтому в работе используется следующий метод. Измеряют периоды колебаний T_0 и T_i относительно обеих призм при различных положениях призмы Π_2 . Затем строят график в прямоугольной системе координат, по оси абсцисс которой откладывают расстояние между призмами, а по оси ординат периоды колебаний. В точке пересечения графиков периоды колебаний равны. В этом случае расстояние между призмами равно приведенной длине физического маятника.

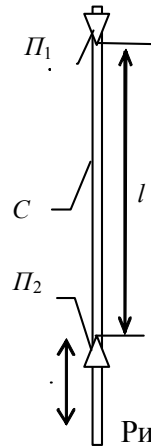
Для автоматического выполнения условия совпадения фаз маятника в момент включения и выключения секундомера на стержне закреплен магнетик, который включает или выключает секундомер при прохождении стержнем положения равновесия.

Опыт 1

Целью опыта 1 является измерение периода колебаний маятника T_0 при подвесе его за неподвижную призму, закрепленную на конце стержня.

Положение магнетика на стержне можно изменять. При измерении T_0 магнетик на стержне установить вблизи подвижной призмы так, чтобы при колебаниях он проходил как можно ближе к геркону, но не задевал его. Геркон находится в медной трубке, прикрепленной к основанию установки. (Геркон – *герметический контакт*. Устройство с консольными пружинками, запаянными в стеклянную трубку и контактирующими под действием магнитного поля.)

1. Отклонить маятник на небольшой угол и отпустить.
2. Установить секундомер на "нуль".
3. В момент одного из максимальных отклонений от положения равновесия нажать кнопку на секундомере и не отпускать ее в течение 10 колебаний. Отсчет числа колебаний, после нажатия на кнопку, начать с числа "нуль". После 10 полных колебаний кнопку отпустить. После очередного прохода магнетика мимо геркона секундомер будет автоматически остановлен. На секундомере будет зафиксировано время 10 колебаний. Вычислить время одного колебания, и занести в таблицу.



4. Повторить пункт 1 еще два раза.
5. Найти среднее значение периода колебаний T_0 за эту призму. Результаты опыта занести в таблицу.

	Опыт 1	Опыт 2				
	Π_1	$h_1=$	$h_2=$	$h_3=$	$h_4=$	$h_5=$
№ измерения	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
1						
2						
3						
ср. значения						

Опыт 2

Следующие пять серий измерений периода колебаний проводятся при подвешивании за другую призму Π_2 , которую можно перемещать по стержню. Конечной целью этих измерений является нахождение такого положения второй призмы, при котором период колебаний маятника T_{rev} на этой призме будет равен периоду T_0 , найденному в опыте 1. Когда периоды $T_0 = T_{rev}$, то расстояние между призмами будет равно приведенной длине физического маятника l_{red} .

1. Подвесить маятник за призму 2. Отрегулировать положение магнитика так, чтобы он проходил как можно ближе к геркону, но не задевал его. Положение призмы определяется по шкале нанесенной на конце стержня. Измерения периодов колебаний проводятся при положениях призмы указанных преподавателем. При каждом положении призмы проделать по три измерения периода колебаний. Найти средние значения периода при каждом положении призмы.

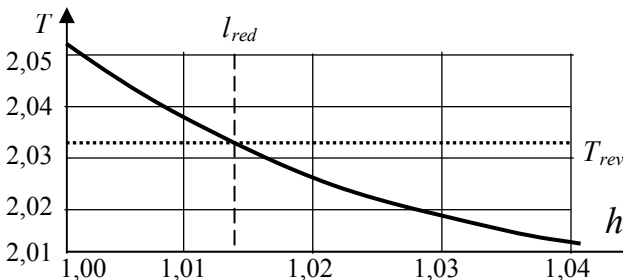


Рис. 2

2. Построить график. Примерный образец графика приведен на рис. 2. На графике по оси абсцисс откладываются расстояния между призмами, а по оси ординат среднее значение периода колебаний за призму Π_1 и пять средних значений периодов колебаний за призму Π_2 . Так как $T_0 = const$, то график этой функции будет иметь вид прямой линии параллельной оси абсцисс.

3. Определить по графику положение призмы Π_2 в котором кривые пересекаются. Если установить призму Π_2 в это положение, то периоды колебаний маятника при подвешивании за призму Π_1 и Π_2 становятся одинаковыми. Найденное положение призмы определяет l_{red} .
4. Установить призму Π_2 в это положение, измерить период колебаний и сравнить с T_0 . В случае если они равны, то значение l_{red} найдено правильно.
5. Подставить экспериментально найденные l_{red} и T_{rev} в формулу (9) и вычислить g .

Оценка систематической погрешности

Оценка производится аналогичным образом, как в предыдущей лабораторной работе. Погрешности при измерении расстояния между призмами и в измерении времени – такие же.

Результат записать в виде: $g = \bar{g} \pm \Delta g$.

Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнение гармонического колебания.
2. Дайте определение частоты, циклической частоты, периода, амплитуды, элонгации, фазы гармонического колебания.
3. Найдите скорость точки при гармоническом колебании. Найдите ускорение колеблющейся точки.
4. Выведите дифференциальное уравнение гармонического колебания.
5. Какому условию удовлетворяет сила, действующая на материальную точку, совершающую гармоническое колебание?
6. Какая сила называется квазиупругой? Чему равен период колебания точки массой m под действием квазиупругой силы?
7. Найдите выражение для кинетической и потенциальной энергии колеблющейся точки. Чему равна полная энергия?
8. Дайте определение математического и физического маятников. Чему равны периоды их колебаний?
9. Какой маятник называется оборотным?
10. Что такое приведенная длина физического маятника? Чему она равна у математического маятника?
11. Как оценить систематическую погрешность измерений?
12. Для каких целей производится измерение времени десяти колебаний, а не одного колебания?
13. Как уменьшить систематическую погрешность измерений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Определение моментов инерции тел с помощью крутильного маятника

Цель работы: Экспериментальным путем найти значение момента инерции крутильного маятника. С помощью крутильного маятника определить момент инерции тела неправильной геометрической формы. Произвести оценку погрешностей измерений.

Описание установки

Установка для определения моментов инерции тел представлена на рис 1.

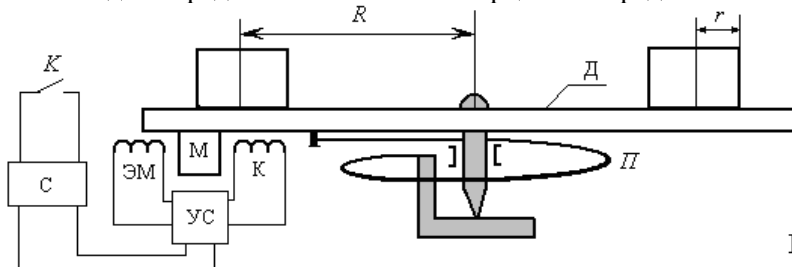


Рис. 1

Установка представляет собой крутильный маятник с компенсацией затухания, вызываемым трением в оси и сопротивлением воздуха (автоколебательная система). Компенсатор состоит из сигнальной катушки (К) и электромагнита (ЭМ), прикрепленных к корпусу прибора, и постоянного магнита (М) прикрепленного к вращающемуся диску, а также усилителя (У) смонтированного в отдельном корпусе.

Диск (Д), выведенный из положения равновесия, может совершать крутильные колебания под действием упругой силы спиральной пружины (П), не путать с винтовой.

Период колебаний такой системы определяется выражением

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{k}}, \quad (1)$$

где I_0 – момент инерции диска, k – коэффициент жесткости спиральной пружины.

При движении постоянного магнита вблизи катушки (К) в ней наводится небольшое напряжение. Это напряжение подается на усилитель (У), усиливается, и далее поступает на электромагнит (ЭМ). Электромагнит притягивает прикрепленный к диску магнит (М) совершая при этом некоторую работу по увеличению угловой скорости маятника. Ускорение маятника осуществляется в моменты прохождения диском положения равновесия, т. е. два раза за один период.

Для того чтобы определять моменты инерции тел с помощью такого устройства необходимо знать и его собственный момент инерции I_0 и период колебаний T_0 .

Определение собственного момента инерции диска

Поместим на диск тело или систему тел с известным моментом инерции I_1 и приведем маятник в колебательное движение. Период колебаний такой системы будет

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + I_1}{k}}, \quad (2)$$

Разделив уравнение (2) на (1), и сделав несложные преобразования, получим

$$I_0 = I_1 \cdot \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_0}\right)^2 - 1}. \quad (3)$$

В работе для определения момента инерции I_0 на диск устанавливаются два груза, имеющие форму цилиндра с известными массами m_1 и m_2 и одинаковыми радиусами r .

Момент инерции такой системы легко рассчитать, используя теорему Штейнера

$$I_1 = (m_1 + m_2) \left(R^2 + \frac{r^2}{2} \right), \quad (4)$$

где R – расстояния от осей грузов до оси вращения; r – собственные радиусы грузов; m_1 и m_2 – массы грузов.

Измерение моментов инерции тел

Итак, параметры I_0 , и T_0 установки известны.

Поместим на диск тело с неизвестным моментом инерции I_x . Период колебания нагруженной системы T_x будет равен

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + I_x}{k}}. \quad (5)$$

Разделив уравнение (5) на (1) и, сделав соответствующие преобразования, можно получить

$$I_x = I_0 \cdot \left[\left(\frac{T_x}{T_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (6)$$

Формула (6) используется в работе для определения моментов инерции тел.

Параметры установки

Радиусы грузов $r = 0,019$ м, значения масс грузиков написаны на их основаниях. Погрешность радиусов грузов $\Delta r = 0,001$ м.

Погрешность, с которой можно установить грузы на диске не превышает $\Delta R = 0,003$ м. Погрешность измерения времени $\Delta T = 0,01$ с.

Порядок выполнения работы

1. Произвести трижды измерения собственного периода колебаний маятника T_0 и найти среднее значение.

№ п/п	T_0	T_1	T_x	I_x	ε_x	$\bar{I}_x \pm \Delta I_x$
1						
2						
3						
Средние значения						

2. Симметрично относительно оси установить на диске два цилиндрических груза на расстояниях по $R = 0,12$ м. Грузы поместить в соответствующие окружности. Привести систему в колебательное движение и измерить ее период колебаний T_1 . Сделать три измерения. Результаты занести в таблицу. Найти среднее значение T_1 .
3. Рассчитать по формуле (6) собственный момент инерции грузов I_1 относительно оси диска.
4. По формуле (3) вычислить I_0 и занести в таблицу.
5. Измерить период колебаний T_x системы с телом, момент инерции которого I_x необходимо определить. Результаты занести в таблицу.
6. Вычислить момент инерции I_x тела по формуле (6).
7. Оценить момент инерции этого тела теоретически. В первом приближении это тело можно считать стержнем. Сравнить теоретическое и экспериментальное значения. Сделать выводы.

Оценка погрешностей

Итак, мы имеем установку по измерению моментов инерции тел неправильной геометрической формы. Теперь необходимо оценить систематическую погрешность, с которой производятся эти измерения, т. е. оценить точность измерений.

Подставим формулы (3) и (4) в формулу (6).

$$I_x = (m_1 + m_2) \left(R^2 + \frac{r^2}{2} \right) \cdot \frac{\left((T_x/T_0)^2 - 1 \right)}{\left((T_1/T_0)^2 - 1 \right)}. \quad (7)$$

Упростим формулу (7). Положим, что $m_1 \approx m_2 = m$, а т. к. $R \gg r$, то значением r можно пренебречь. Получим:

$$I_x = 2mR^2 \frac{T_x^2 - T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}$$

Далее последовательно логарифмируя, дифференцируя, заменяя « \leftarrow » на « \rightarrow » и дифференциалы на приращения, получим окончательно:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta I_x}{I_x} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{2\Delta R}{R} + \frac{4\Delta T}{T_1^2 - T_0^2} + \frac{4\Delta T}{T_x^2 - T_0^2}. \quad (8)$$

Значение ε_x занесите в таблицу.

Абсолютную погрешность найдите по формуле $\Delta I_x = \varepsilon_x I_x$.

Результат в виде $I_x = \bar{I}_x \pm \Delta I_x$, занесите в таблицу.

Контрольные вопросы

1. Чему равен момент инерции точечного тела массой m относительно некоторой оси находящегося от неё на расстоянии r ?
2. Чему равен момент инерции тела произвольной формы относительно некоторой оси?
3. Чему равен момент инерции тонкого кольца относительно оси симметрии?
4. Выведите формулу для вычисления момента инерции сплошного диска относительно оси симметрии.
5. Выведите формулу для вычисления момента инерции тонкого однородного стержня относительно оси, проходящей через середину и перпендикулярной стержню.
6. Чему равен момент силы относительно некоторой оси?
7. Что называется плечом силы?
8. Запишите основной закон динамики вращательного движения.
9. Назовите основные кинематические характеристики вращающегося твёрдого тела. Как связаны линейная и угловая скорости? Как связаны линейное и угловое ускорения?
10. Сформулируйте теорему Штейнера.
11. Найдите момент инерции тонкого стержня относительно оси, проходящей через его конец и перпендикулярной стержню.
12. Найдите момент инерции сплошного диска относительно оси, стоящей от оси симметрии на расстоянии $2R$ и параллельной ей.
13. Расскажите порядок выполнения работы.
14. Выведите формулу (8) для расчета относительной погрешности.

Лабораторная работа № 8

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса

Цель работы: Экспериментально определить коэффициент вязкости глицерина.

Теория метода

Если твердое тело поместить в смачивающую его жидкость, то на его поверхности образуется тонкий слой жидкости, который удерживается силами молекулярного притяжения. Когда тело движется относительно жидкости с некоторой скоростью v , то с той же скоростью перемещается вместе с ним и прилипший слой. Это явление позволяет производить измерение коэффициента методом Стокса.

Сопротивление движению тела со стороны среды при ламинарном обтекании возникает главным образом благодаря вязкости жидкости и пропорционально первой степени скорости. Следовательно, если мы измерим значение силы сопротивления, скорость движения тела v и его радиус r , то сможем найти значение коэффициента внутреннего трения η .

Для измерения коэффициента внутреннего трения Стокс предложил использовать измерение скорости равномерно падающего в жидкости шара (рис. 1). При равномерном движении в жидкости шара сила тяжести уравновешена силой вязкого трения и силой Архимеда. (Вспомните первый закон Ньютона)

$$P = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s g \quad \text{— сила тяжести,}$$

$$F_A = \rho_l g V_s = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l g \quad \text{— сила Архимеда,}$$

$$F_C = 6\pi\eta r v \quad \text{— сила вязкого трения,}$$

где ρ_s — плотность шарика, ρ_l — плотность жидкости, r — радиус шарика, g — ускорение свободного падения.

Сумма проекций этих сил на направление движения шарика равна произведению массы шарика на его ускорение.

$$P - F_C - F_A = ma \quad \text{или}$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_s - \rho_l) g - 6\pi\eta r v = ma. \quad (1)$$

Вначале некоторое время шарик движется ускоренно. Но первый член в правой части уравнения (1) остается постоянным, а второй увели-

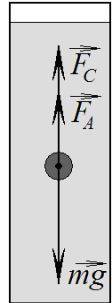


рис. 1

чивается с ростом скорости. Благодаря этому разность между ними при некоторой скорости обращается в нуль. Далее шарик падает равномерно. В наших опытах время ускоренного движения шарика составляет менее 0,01 с, поэтому им можно пренебречь. При равномерном движении уравнение (1) приобретает вид:

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho_s - \rho_l)g - 6\pi\eta r v = 0.$$

Из этого уравнения можно выразить коэффициент вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{v} g r^2, \quad (2)$$

Формула (2) является расчетной в данной лабораторной работе. Для удобства и быстроты расчетов её можно привести к виду

$$\eta = k \cdot \frac{t}{H} \cdot r^2, \quad \text{где } k = \frac{2}{9}(\rho_s - \rho_l)g.$$

Т. о., зная скорость установившегося движения шарика v , плотности ρ_s и ρ_l шарика и жидкости, радиус шарика r , можно вычислить значение коэффициента вязкости жидкости.

Описание автоматизированной экспериментальной установки

Установка состоит из стеклянного цилиндра (Ц), наполненного глицерином. Диаметр цилиндра составляет 24 мм, что на порядок превосходит диаметр шарика, обеспечивая условие безграничности среды. Цилиндр укреплен на вращающейся платформе (ВП) со шкалой. На одном конце цилиндра над пробкой установлен электромагнит (Э), другой также закрыт пробкой (П). В цилиндре может двигаться стальной шарик (Ш) радиусом $r = 1$ мм. Если платформу повернуть так, чтобы электромагнит находился внизу, то шарик опустится вниз и прилипнет к стальному стержню (С), присоединенному к магниту и проходящему через резиновую пробку. Затем платформу перевертывают на 180° . Шарик при этом будет удерживаться электромагнитом на конце стержня (С). При нажатии кнопки (К), которая находится на верхней крышке блока питания (БП), электрическая цепь электромагнита разорвется и шарик, оторвавшись от стержня, начнет падать. Эта же кнопка включит секундомер. В данной лабораторной установке в качестве секундомера используется микрокалькулятор (МК). Когда шарик пройдет необходимое рас-

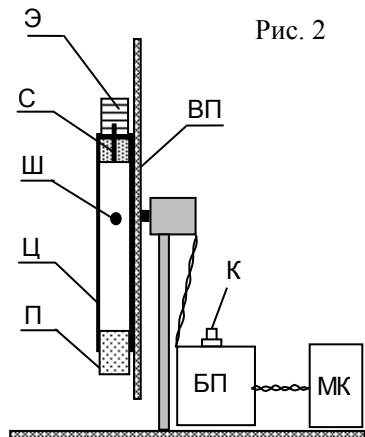


Рис. 2

стояние кнопку отпускают и секундомер покажет время прохождения шариком этого расстояния. Для того, чтобы уменьшить погрешность, возникающую из-за параллакса, глаз нужно расположить так, чтобы необходимая линия шкалы за цилиндром казалась прямой. Искривление линии происходит потому, что мензурка с глицерином обладает свойством цилиндрической линзы и не искажает линию только при правильной установке глаза. Это относится и к вертикальной линии за мензуркой.

№	H , см	t	$t_{\text{ср}}$	$v = H/t_{\text{ср}}$	η	$\Delta\eta$	$\eta_{\text{ср}} \pm \Delta\eta_{\text{ср}}$
1	6						
2							
3							
4	8						
5							
6							
7	10						
8							
9							
средние значения							

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу.
2. Включить блок питания в сеть.
3. Установить на микрокалькуляторе число 0,1.
4. Повернуть вращающуюся платформу так, чтобы магнит оказался внизу. Убедиться, что шарик прилип к стержню.
5. Перевернуть платформу магнитом вверх. Убедиться, что цилиндр расположен строго вертикально.
6. Установить глаз против числа 6 на шкале за цилиндром с глицерином. Глаз расположить так, чтобы линия данного деления шкалы казалась прямой.
7. Нажать кнопку «Пуск». Шарик начнет падать. При прохождении отметки в 6 см кнопку отпустить. Микрокалькулятор покажет время прохождения этого расстояния. Результат занести в таблицу. Прodelать еще два измерения на этой высоте и занести в таблицу.
8. Перевернуть цилиндр. Постараться, чтобы траектория шарика проходила по оси цилиндра. В этом случае шарик практически точно упадет на стержень и прилипнет к электромагниту с первого раза.
9. Сбросить предыдущие показания микрокалькулятора и установить число 0,1.
10. Прodelать измерения времен падения шарика с высот 8 и 10 см, или других высот по указанию преподавателя. Прodelать по 3 измерения на каждой высоте. Все результаты занести в таблицу.
11. Прodelать необходимые вычисления и заполнить все графы таблицы.

12. Вычислить значение числа Рейнольдса по формуле $Re = \frac{\rho_1 v r}{\eta}$, где r – радиус шарика, сделать соответствующие выводы о границах применимости данного метода, при условии, что $Re_{кр} = 1$.

Описание классической экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из мензурки, закрепленной на подставке (П) в которой находится глицерин. На мензурку надеты подвижные проволочные кольца (К) для установки высоты падения стеклянного шарика (Ш). В комплект входит вспомогательная палочка (ВП) для погружения шариков в жидкость. Измерение диаметров стеклянных шариков производится с помощью микроскопа МПБ-2 с 24^х-кратным увеличением. Время падения измеряется при помощи учебного электронного секундомера СЭЦ-100.

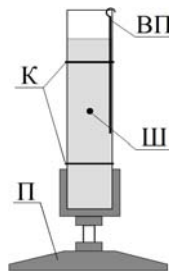


рис. 3

Порядок выполнения работы

1. Заготовить таблицу по образцу.
2. Измерить микроскопом диаметр шарика и занести в таблицу.

№ п/п	H (см)	d (мм)	r (м)	t (с)	$v = H/t$, (м/с)	η (Па·с)	ε	$\Delta\eta$ (Па·с)
1								
2								
3								
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
средние значения								

3. Установить верхнее кольцо на мензурке на 1÷2 см ниже уровня жидкости. Расстояние между верхним и нижним кольцами установить в пределах 12÷20 см и занести в таблицу.
4. Опустить шарик как можно ближе к оси мензурки. Если шарик не тонет, то с помощью вспомогательной палочки протолкнуть его через поверхностный слой жидкости.
5. В момент, когда шарик будет проходить верхнее кольцо, запустить секундомер, а при прохождении нижнего кольца остановить его. Время движения шарика между кольцами занести в таблицу.
6. Ту же операцию проделать 5-6 раз с другими шариками, данные измерений занести в таблицу.
7. Для каждого шарика по формуле (2) вычислить значение коэффициента вязкости и найти его среднее значение.

8. Оценить погрешность измерений по формуле (3).
9. Вычислить значение числа Рейнольдса по формуле $Re = \frac{\rho_l v r}{\eta}$, где r – радиус шарика, сделать выводы о применимости метода Стокса, при условии, что критическое значение для шара $Re_{кр}=1$.

Оценка погрешности

Относительная погрешность измерений оценивается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\rho_s + \Delta\rho_l}{\rho_s - \rho_l} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{2\Delta r}{r}, \quad (3)$$

а абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta\eta = \varepsilon \cdot \eta.$$

Формулы для погрешностей вывести самостоятельно.

Справочные материалы

- плотность глицерина: $\rho_l = 1,22 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,
- погрешность в измерении плотности глицерина: $\Delta\rho_l = 0,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,
- плотность стали: $\rho_s = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,
- погрешность в измерении плотности стали: $\Delta\rho_s = 0,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,
- радиус стального шарика: $r = 10^{-3} \text{ м}$,
- погрешность измерения радиуса стального шарика: $\Delta r = 10^{-5} \text{ м}$,
- плотность стекла: $\rho_s = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,
- погрешность в измерении плотности стекла: $\Delta\rho_s = 0,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,

Контрольные вопросы

1. Напишите выражение для силы вязкого трения между слоями жидкости.
2. Что понимается под коэффициентом внутреннего трения жидкости, и от каких факторов он зависит?
3. Сформулируйте понятие градиента скорости. В каких единицах он измеряется?
4. Какое движение называется ламинарным, какое турбулентным?
5. Запишите формулу числа Рейнольдса. Что оно определяет?
6. Является ли движение жидкости в наших опытах ламинарным?
7. Чему равна сила сопротивления движению шарика в жидкости при малых числах Рейнольдса?
8. Почему в данном методе используются именно шары?
9. Выведите рабочую формулу (2).
10. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
11. Объясните порядок выполнения работы.
12. Выведите формулы для вычисления относительной и абсолютной погрешности.

Лабораторная работа № 9

Определение вязкости воды методом Пуазейля

Цель работы: Экспериментально определить вязкость воды при комнатной температуре методом Пуазейля, оценить погрешность измерений.

Краткая теория метода

Установка для определения вязкости воды (рис. 1) состоит из мензурки площадью поперечного сечения $S_{\perp} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ с нанесенными на неё делениями, капиллярной трубки длиной 80 мм и внутренним радиусом $0,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, клапана, с помощью которого можно выпускать воду из сосуда через капилляр, связанный с кнопкой, которая при открывании клапана запускает секундомер.

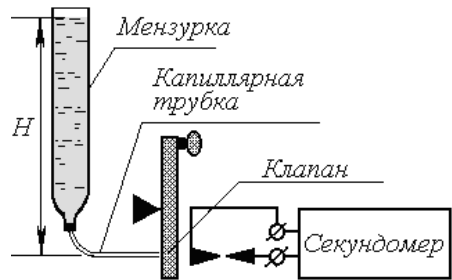


Рис. 1

Если наполнить мензурку водой до высоты H , то перепад давлений на торцах капилляра при открытом клапане будет равен $\Delta p = \rho g H$. В лабораторной установке давление жидкости на торцах капилляра изменяется в зависимости от времени, поэтому для определения вязкости нельзя непосредственно воспользоваться формулой Пуазейля:

$$V = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot R^4 \cdot t}{8 \cdot \eta \cdot l}. \quad (1)$$

Найдем время, за которое уровень жидкости понизится от H_1 до H_2 . За время dt уровень жидкости в мензурке опустится на dH . Приращение объема жидкости (т. е. убыль) будет равно:

$$S_{\perp} dH = - \frac{\pi \rho g H R^4}{8 \eta l} dt. \quad (2)$$

Это дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами. Разделим переменные:

$$\frac{dH}{H} = - \frac{\pi \rho g R^4}{8 S_{\perp} \eta l} dt. \quad (3)$$

Проинтегрировав левую часть от H_1 до H_2 , а правую от 0 до t , получим:

$$\ln \frac{H_1}{H_2} = \frac{\pi \rho g R^4}{8 S_{\perp} \eta l} \cdot t. \quad (4)$$

Из последнего уравнения выразим вязкость:

$$\eta = \frac{\pi \rho g R^4}{8 S_{\perp} l} \cdot \frac{t}{\ln(H_1/H_2)}, \text{ или}$$

$$\eta = k \cdot \frac{t}{\ln(H_1/H_2)}, \text{ где } k = \frac{\pi \rho g R^4}{8 S_{\perp} l}. \quad (5)$$

Формула (5) является расчетной в данной лабораторной работе.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу.
2. По шкале мензурки определить H_1 и занести в таблицу.
3. Открыть клапан и выпустить $\sim 5 \div 6$ мл воды. Уровень жидкости в мензурке понизится до H_2 , записать это значение в таблицу.

№ п/п	H_1	H_2	t	$\ln \frac{H_1}{H_2}$	η	$\langle \eta \rangle$	ε	$\Delta \eta$	$\langle \eta \rangle \pm \Delta \eta$
1									
2									
3									
4									
5									

4. Записать время, за которое опустился уровень жидкости.
5. Прodelать 5 измерений и результаты занести в таблицу.
6. Обработать экспериментальные данные, заполнив все ячейки таблицы.

По полученным результатам необходимо рассчитать число Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle D}{\eta}; \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, $\langle v \rangle$ – средняя скорость течения, D – внутренний диаметр капилляра.

Среднюю скорость течения воды в капилляре, используя уравнение неразрывности струи, можно оценить следующим образом:

$$\langle v \rangle = \frac{V_t}{S_{\perp}} = \frac{\Delta H}{\pi R^2 \cdot \Delta t};$$

Следует помнить, что H по шкале мензурки измеряется в мл! По полученному значению Re сделать выводы о характере движения жидкости в капилляре, и о применимости данного метода измерения вязкости в данных условиях. Значение критического числа Рейнольдса для труб круглого сечения уточнить по учебнику.

Оценка погрешности

Для удобства вычислений формулу (5) следует привести к виду:

$$\eta = k \cdot \frac{t}{\ln(H_1/H_2)} = k \cdot \frac{t}{\ln\left(\frac{H_2 + \Delta H}{H_2}\right)} = k \cdot \frac{t}{\ln\left(1 + \frac{\Delta H}{H_2}\right)}$$

Второе слагаемое под знаком логарифма $\Delta H/H_2 \ll 1$, а для такого случая существует известное разложение в ряд Тейлора, в котором, с достаточной для проводимой оценки точностью, можно ограничиться только первым слагаемым:

$$\ln(1+x) \approx x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{4}x^4 + \dots \approx x.$$

Тогда
$$\eta \approx k \cdot \frac{t}{(\Delta H/H_2)};$$

Далее логарифмируя полученное выражение, запишем:

$$\ln \eta = \ln k + \ln t + \ln H_2 - \ln(H_1 - H_2);$$

Дифференцирование, и соответствующая замена, а также учет того что $\delta H = \delta H_1 = \delta H_2$ и $\delta(H_1 - H_2) = 2\delta H$, позволяет записать для относительной погрешности формулу:

$$\varepsilon = \frac{\delta t}{t} + \frac{\delta H}{H_2} + \frac{2\delta H}{H_1 - H_2};$$

где δt и δH соответственно систематические погрешности секундомера и мензурки.

Далее по известному соотношению находим $\Delta \eta = \langle \eta \rangle \bar{\varepsilon}$.

Контрольные вопросы

1. Чему равна сила вязкого трения?
2. Какая величина называется градиентом скорости?
3. От каких факторов зависит коэффициент внутреннего трения?
4. Вывести формулу Пуазейля.
5. Вывести формулу (5).
6. Что такое уравнение неразрывности?
7. Какие существуют режимы течения непрерывных сред?
8. Вывести формулу для Re .
9. Каковы границы применимости метода Пуазейля, и почему?
10. Объясните принцип действия лабораторной установки.
11. Объясните порядок выполнения работы.
12. Как оценить погрешность измерений?

Лабораторная работа № 10

Измерение коэффициента лобового сопротивления шара

Цель работы: Изучить газо- и гидродинамические законы на примере шара в турбулентном потоке воздуха. Экспериментально определить коэффициент лобового сопротивления шара.

Описание установки

Прибор состоит из центробежного насоса (Н) на основе однофазного асинхронного электродвигателя (М) (рис. 1). Насос соединен с вертикальной ротаметрической трубой (Т) на которую нанесена шкала в см^2 площади поперечного сечения. Регулировка мощности насоса производится при помощи бестрансформаторного регулятора (БТР) изменяющего напряжение питания электродвигателя, которое измеряется вольтметром (V).

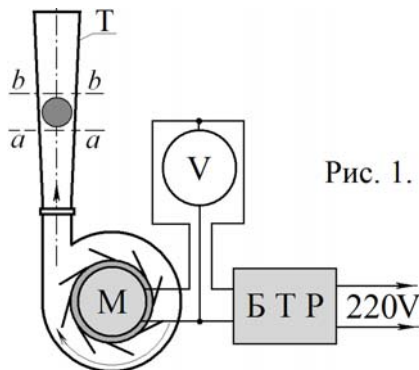


Рис. 1.

Теория метода

На шарик, находящийся в равновесии в восходящем потоке воздуха в ротаметрической трубе (рис. 1), действуют силы давления воздуха на верхнюю и нижнюю части шарика – $p_b S_{\perp}$ и $p_a S_{\perp}$, сила газодинамического сопротивления – $C \frac{\rho v_a^2}{2} S_{\perp}$, сила тяжести – mg . Если считать, что вязкое трение, действующее на боковую поверхность шарика, несущественно, то условие равновесия определяется выражением:

$$p_a S_{\perp} + C \frac{\rho v_a^2}{2} S_{\perp} = p_b S_{\perp} + mg, \quad (1)$$

где p_b и p_a – статические давления на верхнюю и нижнюю части шарика соответственно, S_{\perp} – максимальная площадь поперечного сечения шарика, ρ – плотность воздуха, m – масса шарика, g – ускорение свободного падения, v_a – средняя скорость набегающего на шарик потока воздуха в сечении aa , C – коэффициент лобового сопротивления.

Выражение для разности давлений на верхнюю и нижнюю части шарика примет вид:

$$p_a - p_b = \frac{1}{S_{\perp}} \left(V_s \rho_s g - \frac{1}{2} C \rho v_a^2 S_{\perp} \right) = \frac{4}{3} R \rho_s g - \frac{1}{2} C \rho v_a^2; \quad (2)$$

где V_s – объем шарика, R – его радиус, ρ_s – средняя плотность шарика, получаемая при условии того, что шарик представляется сплошным телом, а не сферой.

Неизвестную разность давлений ($p_a - p_b$) найдем, используя уравнение Бернулли для сечений aa и bb (рис. 1):

$$p_a + \frac{\rho v_a^2}{2} + \rho g h_a = p_b + \frac{\rho v_b^2}{2} + \rho g h_b; \quad (3)$$

где v_b – скорость потока воздуха в сечении bb , h_a , h_b – высоты сечений aa и bb над некоторым начальным уровнем. Из записанного уравнения находим:

$$p_a - p_b = \frac{\rho}{2} (v_b^2 - v_a^2) + \rho g (h_b - h_a). \quad (4)$$

Подставляя выражение (2) в (4), имеем:

$$\frac{4}{3} R \rho_s g - \frac{1}{2} C \rho v_a^2 = \frac{\rho}{2} (v_b^2 - v_a^2) + \rho g (h_b - h_a);$$

произведем почленное деление выражения на плотность воздуха, и учтем, что $h_b - h_a \approx 2R$,

$$\frac{8}{3} R \frac{\rho_s}{\rho} g - C v_a^2 = (v_b^2 - v_a^2) + 4gR;$$

$$C = \frac{(v_a^2 - v_b^2)}{v_a^2} - \frac{4gR}{v_a^2} + \frac{8\rho_s g R}{3\rho v_a^2} = \frac{1}{v_a^2} \left((v_a^2 - v_b^2) + \left(\frac{8\rho_s g R}{3\rho} - 4gR \right) \right);$$

$$B = \frac{8\rho_s g R}{3\rho} - 4gR, \quad \text{где } \rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{3m_s}{4\pi R^3}; \quad B = 36,8 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

$$C = \frac{1}{v_a^2} (v_a^2 - v_b^2 + B) = 1 + \frac{B}{v_a^2} - \frac{v_b^2}{v_a^2};$$

$$v_a S_a = v_b S_b = v_0 S_0 = V_l; \quad \frac{v_b}{v_a} = \frac{S_a}{S_b}; \quad v_a = v_0 \frac{S_0}{S_a}; \quad (5)$$

$$C = 1 + B \left(\frac{S_a}{v_0 S_0} \right)^2 - \left(\frac{S_a}{S_b} \right)^2, \quad (6)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения трубы на нулевой высоте, v_0 – скорость воздушного потока в данном сечении.

Площадь сечения ротаметрической трубы на некоторой высоте h от начального уровня будет определяться выражением:

$$S_h = \pi(h \tan \alpha + r)^2, \quad (7)$$

где h – высота уровня, α – угол раствора конической поверхности, r – внутренний радиус патрубка, на который насажена труба.

Поскольку функцию $S_h = f(h)$, в доступном диапазоне высот, можно считать линейной, то для удобства измерения и простоты расчетов шкала ротаметрической трубы проградуирована в $см^2$, что позволяет опустить расчеты площадей сечения по формуле (7).

Измерение скорости воздушного потока в данной работе основано на предположении о том, что вся полезная мощность P_{use} электродвигателя центробежного насоса переходит в мощность воздушного потока, то есть:

$$P_{use} = \frac{m_t v_0^2}{2} = \frac{\rho V_t v_0^2}{2} = \frac{\rho S_0 v_0^3}{2}; \quad (8)$$

где m_t – массовый расход воздуха, V_t – объемный расход. Выражая из записанной формулы скорость, заменяя при этом объемный расход по одной из формул (5), получаем:

$$v_0 = \sqrt[3]{\frac{2P_{use}}{\rho S_0}} = \sqrt[3]{\frac{2\eta P_{supp}}{\rho S_0}}; \quad (9)$$

где η – коэффициент полезного действия электродвигателя, P_{supp} – затрачиваемая из электросети мощность.

Регулировка скорости воздушного потока достигается за счет изменения питающего электродвигатель напряжения U . Затрачиваемая мощность в таком случае является некоторой функцией напряжения, следовательно, скорость $v_0 = f(P_{supp}) = f(U)$. Предварительные измерения позволили получить градуировочный график, показанный на рис. 2, который позволяет, опуская расчеты по формуле (9), определить скорость v_0 непосредственно по измеренному напряжению U . Найденное значение скорости подставляется в формулу (6).

Для проверки результата измерений предлагается использовать график зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса в логарифмических координатах (рис. 3), приведенный в [Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, т. 6 Гидродинамика, М., «Наука», 1986, с. 256.]. Данный график был получен экспериментально путем высокоточных методов измерения в аэродинамической трубе с использованием специальных аэродинамических весов.

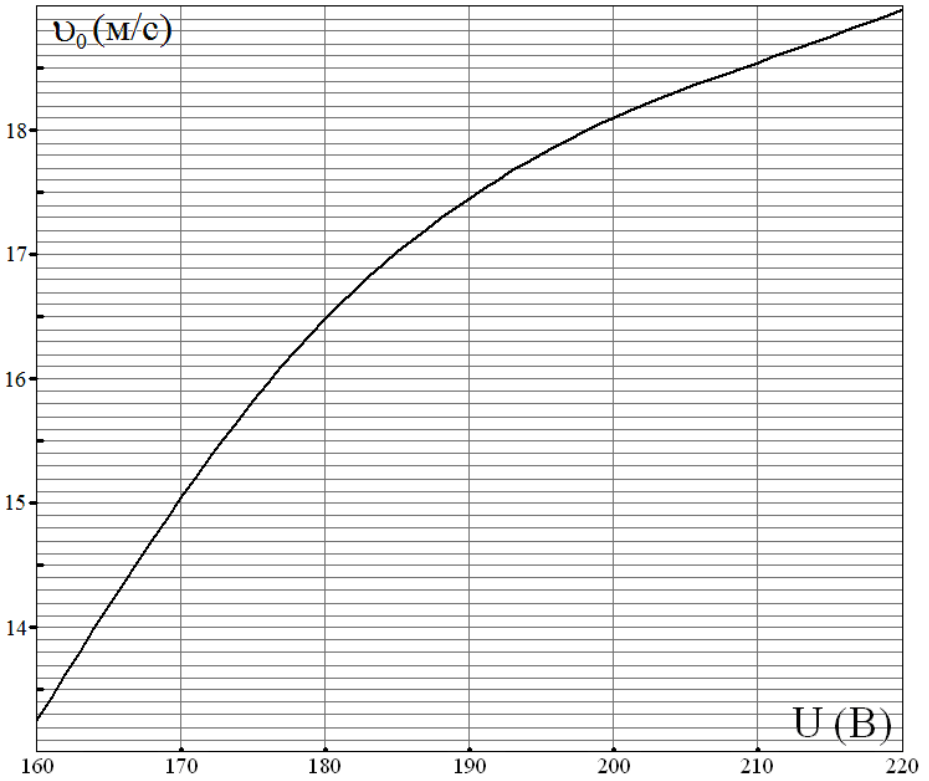


Рис. 2. Зависимость скорости v_0 от измеренного напряжения.

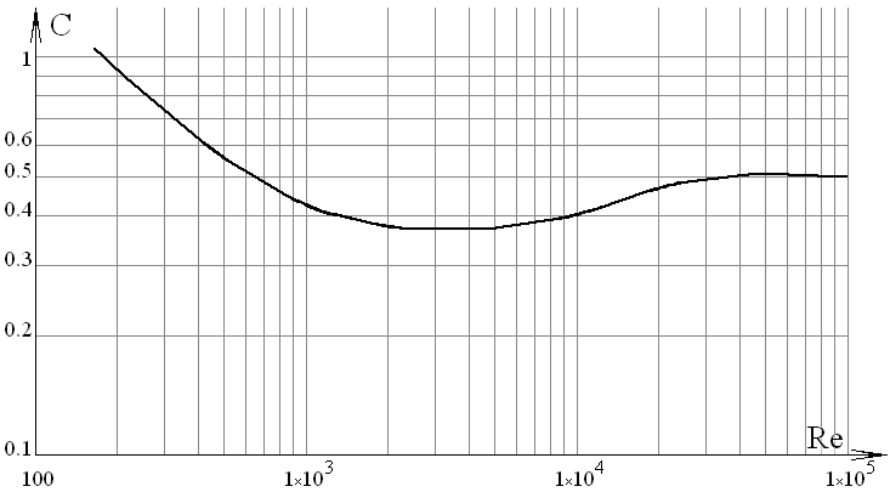


Рис. 3. Зависимость коэффициента лобового сопротивления шара от числа Рейнольдса в логарифмических координатах.

Для сопоставления значений коэффициентов лобового сопротивления необходимо установить значение числа Рейнольдса, которое определяется по формуле:

$$Re = \frac{\rho v_h D}{\mu}; \quad (10)$$

где v_h – скорость набегающего на шарик потока воздуха на высоте h , D – диаметр шарика, μ – вязкость воздуха. Для удобства использования ранее полученных по графику на рис. 2 значений скорости v_0 , заменим скорость потока воздуха на произвольной высоте в (10):

$$Re = \frac{\rho D v_0 S_0}{\mu S_a}. \quad (11)$$

Порядок выполнения работы

1. Заготовить таблицу.

	$U, (B)$	$v_0, (м/с)$	$S_{a_2}, (см^2)$	$S_{b_2}, (см^2)$	C	ΔC	Re	ΔRe
1								
2								
3								
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
средние значения								

2. Ручку регулировки напряжения перевести в крайнее левое положение. Включить установку в сеть.
3. Установить на вольтметре значения напряжения, указанные преподавателем, произвести замер площадей сечения S_a и S_b , занести их в таблицу.
4. По графику на рис. 2 определить соответствующие указанным значениям напряжения скорости воздушного потока.
5. Вычислить по формуле (6) значения коэффициента лобового сопротивления, занести их в таблицу.
6. Вычислить по формуле (11) значения числа Рейнольдса, занести в таблицу.
7. Погрешность измерений вычислить как модуль разности среднего значения соответствующей величины и каждого из измеренных поочередно. Результат записать в соответствующую клетку таблицы.
8. Перенести график на рис. 3 в тетрадь.

9. Далее, по полученному среднему значению числа Рейнольдса, сравнить измеренное в данной работе значение C с рис. 3 отметив его на графике.
10. Сделать необходимые выводы.

Параметры, используемые в работе

- масса шарика – 2,333 г,
- плотность воздуха $\approx 1,2 \text{ кг/м}^3$,
- радиус шарика – 18 мм,
- вязкость воздуха $\approx 1,814 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$,
- угол раствора конической поверхности трубы – $0,859^\circ$
- площадь сечения трубы на нулевой высоте – $12,57 \text{ см}^2$,
- КПД электродвигателя – $15 \div 26\%$.

Контрольные вопросы

1. Как определяют режим течения непрерывной среды?
2. Что такое коэффициент лобового сопротивления и от чего он зависит?
3. Что такое подъемная сила и как она возникает?
4. Что такое угол атаки?
5. Объясните понятие качества крыла.
6. Сформулируйте теорему Жуковского.
7. Может ли лобовое сопротивление быть равным нулю?
8. Вывести расчетную формулу.

Лабораторная работа № 11

Измерение скорости звука в воздухе

Цель работы: Определить экспериментально значение скорости звука в воздухе и сравнить его со значением вычисленным теоретически.

Описание установки

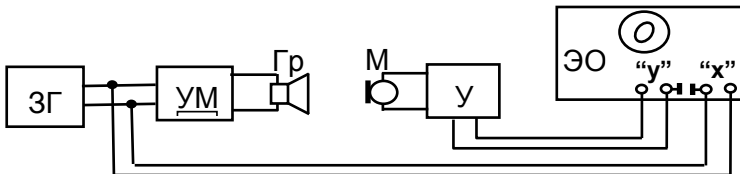


Рис. 1

Установка (рис. 1) состоит из следующих устройств: ЗГ – звуковой генератор; УМ – усилитель мощности электрических колебаний, к выходу которого подключен громкоговоритель (Гр), преобразующий электрические колебания в звуковые; У – усилитель, служащий для усиления

сигнала микрофона (М); ЭО – электронный осциллограф, служащий для регистрации разности фаз между колебаниями, излучаемыми громкоговорителем и улавливаемыми микрофоном.

Краткая теория

Синусоидальный электрический сигнал от звукового генератора подается на вход «Х» электронного осциллографа и далее на горизонтально отклоняющие пластины электронного осциллографа. Одновременно сигнал от звукового генератора подается и на усилитель мощности с выхода которого сигнал поступает на громкоговоритель. Громкоговоритель является источником звуковых волн. Звуковая волна, пройдя некоторое расстояние l , достигает микрофона. При этом она изменит фазу колебаний относительно сигнала генератора на $\Delta\varphi = 2\pi l/\lambda$, где l – расстояние между громкоговорителем и микрофоном. Микрофон преобразует звуковые колебания в электрические, которые после усиления подаются на вход «У» и далее на вертикально отклоняющие пластины ЭО. Осциллограф служит для регистрации разности фаз колебаний $\Delta\varphi$, поступающих от ЗГ и микрофона.

На экране электронно-лучевой трубки ЭО происходит сложение взаимно перпендикулярных колебаний. При разности фаз колебаний $\Delta\varphi = n\pi$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ будут наблюдаться прямые линии. При других разностях фаз – эллипсы.

Случай 1. Пусть на входы X и Y подаются сигналы:

$$x = a \sin \omega t, \quad y = \pm b \sin \omega t,$$

т. е. разность фаз между сигналами. $\Delta\varphi = 0$. Чтобы получить траекторию луча необходимо исключить время из уравнений (1). Разделим первое уравнение на второе и выразим y . $y = \pm \frac{b}{a} x$. Мы получили уравнение прямой, проходящей через начало координат.

Случай 2. Пусть на входы X и Y подаются сигналы:

$$x = a \sin \omega t, \quad y = b \cos \omega t.$$

Т. к. по формулам приведения $\cos \omega t = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right)$, то разность фаз между сигналами будет $\pi/2$. Найдем вид траектории луча на экране осциллографа. Выразим из уравнений (17) синус и косинус, возведем их в квадрат и сложив, получим: $\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$. Это уравнение эллипса.

Если $a = b = R$, то эллипс превращается в окружность радиуса R :

$$x^2 + y^2 = R^2 .$$

Таким образом, вид траектории луча на экране осциллографа зависит от разности фаз сигналов, подаваемых на входы X и Y . Разность фаз сигналов зависит от расстояния между источником и приемником звука: если расстояние изменяется на целое число длин волн, Фаза принимаемого сигнала $\Delta\varphi$ изменяется на целое число 2π , и картина на экране повторяется.

Зная частоту звука, излучаемого громкоговорителем, можно вычислить скорость по формуле $v = \lambda\nu$.

Экспериментальная часть

1. Подготовьте таблицу.

Установка частоты	ν , кГц	x_1 , см	x_2 , см	n	$\lambda = \frac{x_2 - x_1}{n}$, м	$v = \lambda\nu$, м/с	Δv , м/с	$v_{\text{ср}} \pm \Delta v_{\text{ср}}$
1	19			1				
				2				
				3				
2	17,1			1				
				2				
				3				
3	15,3			1				
				2				
				3				
4	12,6			1				
				2				
				3				
средние значения								

2. Включить установку для определения скорости звука и осциллограф.
3. Дать прогреться приборам 5 минут.
4. Установить переключатель «Установка частоты» в положение 1. Генератор будет выдавать частоту 19 кГц.
5. Передвигая по скамье микрофон, установить его так, чтобы на экране осциллографа была прямая линия. Записать координату положения микрофона x_1 в таблицу.
6. Отодвигая микрофон от громкоговорителя, следить за изменением картины на экране осциллографа. Остановить микрофон в положении, когда на экране будет такая же прямая, как и при координате x_1 . При этом фаза принимаемого сигнала изменится на 2π , а смещение рейтера с микрофоном на $l = \lambda$. Для уменьшения погрешности измерений можно переместить рейтер с микрофоном на несколько длин волн, например на $n = 1, 2, 3$. Координату нового положения микрофона x_2 занести в таблицу.

7. Установить переключатель «Установка частоты» в положения 2, 3, 4, при этом будут генерироваться частоты 17,1 кГц, 15,3 кГц, 12,6 кГц, проделать задания пунктов 5 и 6. Результаты измерений занести в таблицу.
8. Вычислить значения длин волн и скорости звука при различных частотах и занести в таблицу.
9. Оценить погрешность измерения скорости звука.
9. Сравнить экспериментально найденное значение ν с теоретическим значением, вычисленным по формуле $\nu = \sqrt{\gamma RT/\mu}$, где $\gamma=1,4$; $R=8,31$ Дж/(моль·К); $\mu=0,029$ кг/моль (молярная масса воздуха). Значение температуры T в лаборатории уточнить у преподавателя. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое волны? Как возникают упругие волны?
2. Что такое гармоническая волна? Длина волны? Волновое число?
3. Какие волны называются продольными? Поперечными?
4. Запишите связь между скоростью волны, ее длиной и частотой.
5. Запишите волновое уравнение и его решение.
6. Чем определяется скорость звука в упругой среде?
7. Запишите формулу для определения скорости звука в газе.
8. Объясните методику измерения длины волны в данной работе.
9. Опишите порядок обработки экспериментальных данных для оценки погрешности.

Лабораторная работа № 12

Эффект Доплера

Цель работы: экспериментально исследовать эффект Доплера на примере распространения ультразвуковых волн в воздухе и применить его для измерения средней скорости движения стержня физического маятника.

Краткая теория

Эффект Доплера – изменение частоты звуковых или электромагнитных волн при движении приемника и/или источника.

Этот эффект широко применяется в науке и технике. В астрономии эффект Доплера лежит в основе методов по определению лучевых скоростей движения звезд, измерения скорости вращения солнечного диска, планет и т. д. В радиолокации используется для обнаружения движущихся наземных и воздушных целей и измерения их скоростей. В автотематике применяется для бесконтактного определения скорости движе-

ния тел и сплошных сред, например, определение скорости молока в молокопроводах.

Обратим, прежде всего, внимание на то, что звуковая волна, испущенная источником, распространяется со скоростью, которая *не зависит ни от скорости движения источника, ни от скорости приемника*.

При движении источника или приемника относительно среды, изменяется наблюдаемая частота волны. Это изменение связано с тем, что наблюдатель определяет частоту колебаний как полное число «волн», которое проходит через приемник за единицу времени, в то время как $\nu_0 = c/\lambda_0$ определяет число волн, укладывающееся на пути, пройденном волной за единицу времени (λ_0 – длина волны, c – скорость распространения волны в среде, т. е. путь, проходимый волной в единицу времени).

Введем обозначения: ν_0 – частота колебаний излучаемой волны; ν_1 – частота колебаний, воспринимаемых наблюдателем (приемником); u – скорость движения источника относительно среды; v – скорость наблюдателя (приемника) относительно среды; c – скорость звука в воздухе.

Условимся считать скорость u положительной, если источник приближается к наблюдателю, и отрицательной, если он удаляется от него. Аналогичные условия введем и для знака скорости v приемника.

В данной работе приводится в движение источник звука, который прикреплен на конец стержня маятника и может либо удаляться, либо приближаться к приемнику. Рассмотрим случай, когда источник приближается к наблюдателю со скоростью u . Наблюдатель неподвижен, т. е. $u > 0$, $v = 0$. За один период $T = 1/\nu_0$ волна распространяется на расстояние, равное длине λ_0 . Но за это же время источник пройдет в направлении волны путь $S = uT$, в результате чего «эффективная» длина волны уменьшится на uT .

$$\lambda_1 = \lambda_0 - uT = cT - uT = (c - u)T.$$

Это видно на рис. 1. B и B_1 – положения источника в начале и конце одного периода T . Так как $\lambda_1 < \lambda_0$, то число колебаний, воспринимаемых наблюдателем в единицу времени, увеличится:

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{(c - u)T} = \frac{c}{(c - u)} \nu_0.$$

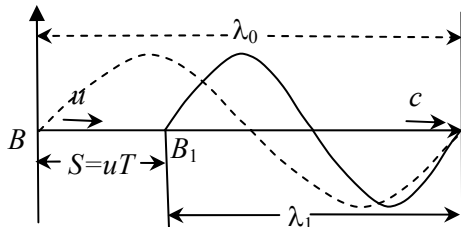


Рис. 1

Т. о., за счет уменьшения длины волны число колебаний, воспринимаемых наблюдателем, больше частоты излучаемых колебаний в $c/(c - u)$ раз. Для удаляющегося источника, очевидно, частота воспри-

нимаемых колебаний в $c/(c+u)$ раз меньше частоты излучаемых колебаний ν_0 и $\nu_1 = \frac{c}{c+u} \nu_0$. В общем виде для этого случая

$$\nu_1 = \frac{c}{c \mp u} \nu_0 = \nu_0 / \left(1 \mp \frac{u}{c} \right). \quad (1)$$

Для удаляющегося источника частота воспринимаемых колебаний $\nu_1 = c\nu_0/(c+u)$. Отсюда можно найти среднюю скорость движения u источника звука:

$$u = c \left(\frac{\nu_0}{\nu_1} - 1 \right) = c \left(\frac{\nu_0 - \nu_1}{\nu_1} \right) = c \frac{\Delta \nu}{\nu_1}. \quad (2)$$

Формула (2) является расчетной в данной лабораторной работе.

Описание установки

Устройство экспериментальной установки представлено на рис. 2.

Источником ультразвука служит пьезокварц, расположенный в генераторе (ГУ). Он преобразует электрические колебания в ультразвуковые. Другой пьезокварц, находящийся в приемнике ультразвука (ПУ), преобразует принятые им ультразвуковые колебания в электрические. Источник колебаний размещен на нижнем конце физического маятника; приемник в отдельном блоке.

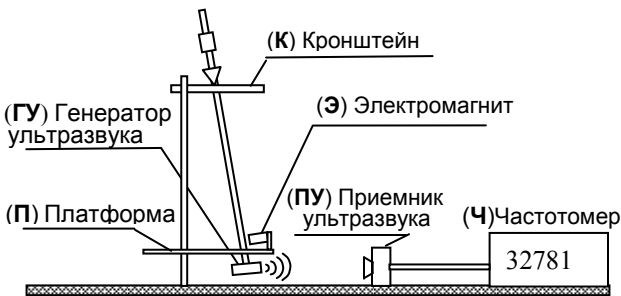


Рис. 2

Сигнал с приемника ультразвука (ПУ) подается на электронный частотомер (Ч). Частотомер является очень точным прибором, его погрешность не превышает 1 Гц.

Электромагнит (Э), установленный на платформе (П), служит для удерживания стержня маятника перед пуском. На платформе имеется линейка, служащая для измерения амплитуды колебаний маятника.

Порядок выполнения работы

1. Изучить описание к лабораторной работе и заготовить сетку таблицы.

№	v_1	v_0	$\Delta v = v_0 - \bar{v}_1$	x_1	x_2	$A = x_1 - x_2$	$u_{cp} = 2A$	c	$u_{из}$
1									
2									
3									
\bar{v}_1									

2. Приемник ультразвука (ПУ) соединить с частотомером (Ч). Штекер с черным проводником, выходящим из частотомера, подключается к клемме «Корпус» приемника (ПУ).
3. Проводники от электромагнита (Э) с разъемным штекером на конце вставить в разъем находящимся на задней стенке частотомера.
4. Включить шнур питания частотомера в сеть и перевести тумблер «Сеть» на задней стенке частотомера в верхнее положение.
5. Далее необходимо измерить амплитуду колебаний маятника. Приспособлением с названием «Прицел», по линейке на платформе, определяется координата (x_1) конца свободно висящего маятника и заносится в таблицу.
6. Отклонить стержень маятника от вертикали и осторожно подвести к электромагниту. Маятник должен «прилипнуть» к нему; если этого не происходит, то нужно отрегулировать плоскость колебаний маятника и положение электромагнита с помощью кронштейна (К) в верхней части маятника и платформы (П). С помощью приспособления «Прицел» определяется координата отклоненного маятника (x_2) и заносится в табл. 1. Разность координат будет амплитудой A колебаний маятника. Во время измерений маятник будет проходить расстояние $2A$. Маятник отрегулирован таким образом, что период его колебаний $T = 2$ с, следовательно, весь путь в $2A$ от одного конца до другого он будет проходить за одну секунду, поэтому численное значение средней скорости конца маятника будет

$$u = \frac{2A}{T/2} = \frac{4A}{T} = 2A \text{ м/с.}$$

7. Рассчитать среднюю скорость, которую будет иметь маятник за половину периода, и занести в таблицу. Скорость выразить в м/с.
8. Подключить разъем батареи питания к генератору ультразвука (ГУ). Разъем находится на задней стенке генератора (ГУ).
9. Перевести тумблер на верхней крышке приемника (ПУ) в положение «Вкл».
10. Частотомер будет измерять частоту неподвижного источника звука.

Значение этой частоты будет порядка $\nu_0 = 32781$ Гц. Занести показания частотомера в таблицу.

11. Через промежутки времени в $3,5$ с частотомер начинает производить измерение частоты. В момент счета колебаний в течение 1 с происходит мелькание цифр частотомера, затем в течение $2,5$ секунд происходит индикация измерений, после этого частотомер автоматически установится на «нуль», затем вновь «мелькание» и т.д.
12. В очередной период индикации (в момент, когда мелькание цифр прекращается) нажать кнопку «Пуск» и удерживать ее.
13. В момент начала очередного счета колебаний (начнется мелькание цифр на шкале частотомера) произойдет «отлипание» стержня маятника от электромагнита и он придёт в движение. При этом продолжать удерживать кнопку «Пуск».
14. После остановки счета (мелькание цифр прекратится) отпустить кнопку «Пуск» и быстро перевести палец на кнопку «Стоп» и удерживать ее в течение времени необходимого для записи результата измерения ν_1 в протокол (это показания частотомера).
15. Отпустить кнопку «Стоп», подвести маятник к электромагниту, в необходимый момент (см. пункт 13) нажать «Пуск» и проделать указания пунктов 14, 15, 16. Произвести еще 2 измерения частоты ν_1 .
16. Скорость звука рассчитать по формуле $c = \sqrt{\gamma RT/M}$, где $R=8,31$ Дж/(моль·К), для воздуха $\gamma=1,4$; $M = 0,029$ кг/моль. Температуру воздуха в лаборатории уточнить у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель работы.
2. Объясните в чем суть явления эффекта Доплера? Почему изменяется частота, воспринимаемая наблюдателем, при движении источника или наблюдателя?
3. Изменяется ли скорость звука в воздухе при движении источника или наблюдателя?
4. Выведите формулу, по которой изменяется частота при движении источника, наблюдатель при этом неподвижен.
5. Объясните устройство и принцип действия лабораторной установки.
6. Объясните, как определяется средняя скорость конца маятника обычными средствами?
7. Как определить скорость движения источника звука, используя эффект Доплера? Какие измерения для этого необходимо произвести?
8. Как оценивается скорость звука в воздухе при разной температуре?
9. Проанализируйте возможные причины погрешности измерения скорости с помощью эффекта Доплера.

Лабораторная работа № 13

Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана-Дезорма

Цель работы: Определить экспериментально значение отношения $\gamma = C_p/C_V$ и сравнить его со значением вычисленным теоретически.

Описание установки

Установка для экспериментального определения показателя адиабаты состоит из стеклянного баллона 1 ёмкостью примерно 20 л, клапана К, соединяющего баллон с атмосферой, поршневого насоса Н, водного манометра М, состоящего из сосуда 2 трубки Т и линейки Л (рис. 1).

1. С помощью насоса в баллоне создается небольшое избыточное давление порядка 20÷25 см водного столба. Напомним, что атмосферное давление составляет примерно 10 м водного столба. Водяным манометром М измеряют давление в баллоне. Пусть это давление p_1 , а температура газа T_0 .

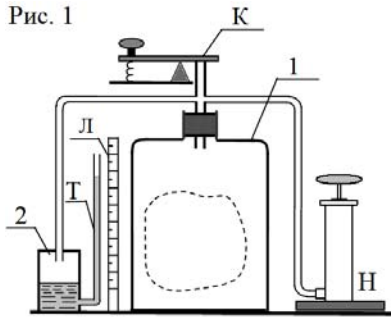
2. Затем на короткое время открывают клапан К. Часть газа выйдет из баллона и его давление сравняется с атмосферным p_0 . Газ в баллоне адиабатически расширяется, температура его понизится.

3. Клапан К быстро закрываем, воздух начнет нагреваться и достигнет температуры T_0 . Давление газа станет p_2 . По измеренным давлениям p_1, p_2 можно вычислить $\gamma = C_p/C_V$.

Этот метод измерения γ для газов предложили Николя Клеман (1779-1842) и Шарль Бернар Дезорм (1771-1862) в 1819 году. Теплоемкость газов при постоянном объеме C_V является трудно измеримой величиной. Теплоемкость при постоянном давлении C_p величина легко измеряемая экспериментально. Метод, предложенный Клеманом и Дезормом, позволил преодолеть эту трудность. По экспериментальному значению C_p и γ можно по формуле C_p/C_V вычислить значение C_V .

Краткая теория метода

Для получения расчетной формулы мысленно выделим внутри баллона произвольный объем ограниченный замкнутой поверхностью. Эта поверхность изображена на рисунке пунктиром. В различных процессах газ, заключенный в эту «оболочку» будет расширяться и сжиматься. В



моменты отсчета давления параметры газа в этой «оболочке» имели следующие значения:

$$\{1\} \text{ состояние } - p_1, T_0, V_1; \quad \{2\} \text{ состояние } - p_0, T, V_2;$$

$$\{3\} \text{ состояние } - p_2, T_0, V_2.$$

Разности давлений $p_1 - p_0$, $p_2 - p_1$, в нашей установке примерно в 50 раз меньше атмосферного давления p_0 , поэтому с этими разностями мы будем обращаться как с дифференциалами. Переход газа из состояния $\{1\}$ в состояние $\{2\}$ совершается адиабатически, поэтому они связаны уравнением:

$$\gamma p dV + V dp = 0.$$

Полагая, что $dV = V_2 - V_1$, $dp = p_0 - p_1$, запишем:

$$\gamma p(V_2 - V_1) + V(p_0 - p_1) = 0. \quad (1)$$

В состояниях $\{1\}$ и $\{3\}$ температуры газа одинаковы, поэтому в этих состояниях $pV = \text{const}$. Возьмем дифференциал от этого выражения

$$pdV + Vdp = 0, \text{ или}$$

$$p(V_2 - V_1) + V(p_2 - p_1) = 0. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и преобразуем:

$$-\gamma V(p_1 - p_2) + V(p_0 - p_1) = 0 \Rightarrow$$

$$\gamma = \frac{p_0 - p_1}{p_1 - p_2}. \quad (3)$$

В формулу (3) входят разности давлений, поэтому безразлично, в каких единицах измерять давления. Разность $p_0 - p_1 = \rho g h_1$, а разность $p_1 - p_2 = \rho g(h_1 - h_2)$, где ρ – плотность жидкости в манометре, поэтому получим:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (4)$$

Эта формула является расчетной в данной работе.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу

№	h_1	h_2	γ	$\bar{\gamma}$	$\Delta\gamma_i$	$\Delta\gamma_{\text{sq}}$	$\bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$
1							
2							
⋮		⋮			⋮		
⋮		⋮			⋮		
n							

2. Нажать клапан К. Давление в баллоне станет равным атмосферному p_0 .

3. Закрыть клапаном К баллон. При помощи насоса Н накачать в сосуд воздух. Давление в стеклянном баллоне должно увеличиться примерно

на 40 см водного столба. Воздух в баллоне немного нагреется. Необходимо подождать некоторое время (около 1 минуты), чтобы температура воздуха в баллоне стала равной комнатной T_0 . После того как уровень жидкости в трубке Тр перестанет изменяться, температура в баллоне станет равной комнатной. Занести в таблицу значение высоты h_1 на которую поднимется жидкость в трубке манометра Тр.

4. Нажать клапан К и в момент, когда уровень жидкости в трубке Тр достигнет нулевой отметки, быстро отпустить клапан. Часть воздуха выйдет из баллона. Т. к. этот процесс протекает очень быстро (порядка 1 секунды), то его можно считать адиабатическим. Воздух в баллоне охладится. Подождать некоторое время (порядка 2-х минут), чтобы воздух в баллоне прогрелся до комнатной температуры. Давление в баллоне будет возрастать, и это зарегистрирует манометр. Занести в таблицу показания манометра, т. е. высоту h_2 в трубке Тр манометра.
5. Прodelать пункты 2, 3, 4 не менее пяти-шести раз.
6. Обработать экспериментальные результаты и заполнить таблицу. Для оценки погрешностей использовать следующие формулы:

$$\Delta\gamma_i = |\gamma_i - \bar{\gamma}|; \quad \Delta\gamma_{sq} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\gamma_i^2}.$$

7. Рассчитать теоретическое значение по формуле $\gamma = (i+2)/i$, где i – число степеней свободы молекул воздуха. Сравнить его с экспериментальным. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Чему равна средняя энергия одной молекулы?
2. Запишите выражение для внутренней энергии идеального газа. От каких факторов она зависит? Как определить число степеней свободы молекулы?
3. Сформулируйте первое начало термодинамики. Как можно изменить внутреннюю энергию идеального газа?
4. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости вещества.
5. Пользуясь первым началом термодинамики, получите выражения для молярных теплоемкостей идеального газа C_p и C_v . Выведите уравнение Майера.
6. Объясните, почему у газов, в отличие от твердых тел и жидкостей, две теплоемкости C_p и C_v .
7. Какой процесс называется адиабатическим? Как выглядит первое начало термодинамики для адиабатического процесса? Выведите уравнение Пуассона.
8. Запишите выражение для коэффициента Пуассона и вычислите его

значение для воздуха. От каких факторов зависит коэффициент Пуассона (показатель адиабаты)?

9. Объясните устройство экспериментальной установки и порядок проведения экспериментов на ней.
10. Выведите расчетную формулу (16).
11. Опишите порядок обработки экспериментальных данных.
12. Напишите формулу для вычисления среднеквадратичной погрешности.

Лабораторная работа № 14

Определение вязкости воздуха методом Пуазейля

Цель работы: Определить экспериментально вязкость воздуха методом Пуазейля, оценить погрешность измерений и сравнить с табличными данными для вязкости воздуха.

Один из методов измерения вязкости газа или жидкости основан на определении объема вещества, прошедшего через капиллярную трубку за определенное время.

Описание установки

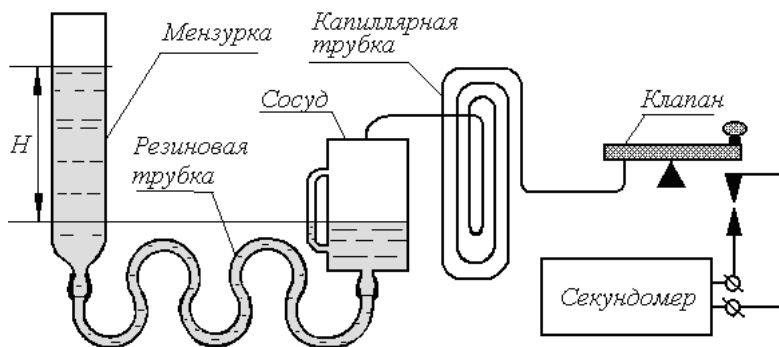


Рис. 1

Установка для определения вязкости воздуха изображена на рис. 1. Она состоит из мензурки длиной 0,7 м и площадью поперечного сечения $S_{\perp} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ с нанесенными на неё делениями в мл. Так же закрытого сосуда соединенного с капиллярной трубкой длиной $l=2,7$ м и внутренним радиусом $R=0,49 \cdot 10^{-3}$ м. С помощью клапана можно выпускать воздух из сосуда через капилляр, при этом происходит запуск секундомера.

Описание краткой теории метода с выводом расчетной формулы приведено в лабораторной работе № 11 «Определение вязкости воды методом Пуазейля».

$$\eta = k \cdot \frac{t}{\ln(H_1/H_2)}, \quad \text{где } k = \frac{\pi \rho_w g R^4}{8 S_{\perp} l} \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды, формула (1) является расчетной в данной лабораторной работе.

Теоретическая оценка вязкости воздуха

Для проверки адекватности экспериментального метода необходимо провести теоретическую оценку коэффициента вязкости воздуха, основанную на представлениях физической кинетики. Вязкость газов вычисляется по формуле:

$$\eta = \rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{\lambda} / 3,$$

где ρ – плотность газа при соответствующем давлении и температуре, \bar{v} – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул, $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега.

Плотность воздуха ρ оценим, используя уравнение Менделеева-Клапейрона.

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{p\mu}{RT},$$

где μ – молярная масса воздуха, равная 0,029 кг/моль.

Средняя арифметическая скорость молекул равна:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}.$$

Средняя длина свободного пробега определяется формулой:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$$

где $d = 3 \cdot 10^{-10}$ м – эффективный диаметр молекул, n – концентрация молекул, которую определим по формуле $n = p/kT$.

Значения атмосферного давления и температуры воздуха уточнить у преподавателя.

Для сравнения, табличное значение вязкости воздуха при давлении $p = 10^5$ Па, и температуре $T = 293$ К: $\eta = 1,814 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу.
2. Осторожно поднять закрытый сосуд с капилляром на высоту около 1 м над столом и нажать кнопку клапана. Клапан держать до тех пор, пока жидкость заполнит мензурку до самого верха. Закрыть клапан и опустить сосуд на стол.

№	H_1	H_2	t	$\ln \frac{H_1}{H_2}$	η	$\eta_{\text{ср}}$	$\Delta \eta_i$	$\Delta \eta_{\text{ср}}$
1								
2								
3								
4								
5								

- С помощью клапана опустить уровень жидкости в мензурке до нулевой отметки (находится в верхней части мензурки).
- Занести в таблицу H_1 . Высота H_1 равна разности между уровнем жидкости в сосуде и мензурке.
- Установить секундомер на «ноль».
- Открыть клапан на время около 10 секунд и закрыть. Уровень жидкости в мензурке понизится. Записать значение H_2 .
- Проделать 5 измерений и результаты занести в таблицу.
- Вычислить коэффициент вязкости по формуле (1), произвести оценку абсолютного отклонения от среднего значения по формуле $\Delta \eta_i = |\eta_i - \bar{\eta}|$.
- Вычислить теоретическое значение вязкости воздуха при данной температуре и сравнить с экспериментальным, сделать выводы.

Контрольные вопросы

- Объясните механизм возникновения внутреннего трения в газе с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
- Чему равна сила трения между соседними слоями газа, движущимися с различными скоростями?
- Какая величина называется градиентом скорости?
- От каких факторов зависит коэффициент внутреннего трения?
- Выведите формулу (2).
- Выведите формулу Пуазейля (3).
- Выведите формулу (4).
- Объясните принцип действия лабораторной установки.
- Объясните порядок выполнения работы.
- Как оценить погрешность измерений.

Лабораторная работа № 15

Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца

Цель работы: Экспериментально определить коэффициент поверхностного натяжения воды и сравнить полученные значения с табличными.

Краткая теория

На сегодняшний день в физике нет вполне законченной и общепризнанной теории жидкости. Это обусловлено тем, что жидкое состояние, занимая промежуточное положение между газами и кристаллами, является сложным по своим свойствам.

Для жидкостей, как и для кристаллов, характерно наличие объема, но для кристаллического состояния характерно упорядоченное расположение частиц (атомов или молекул) – дальний порядок, т. е. упорядоченное расположение частиц по отношению к любой частице в пределах всего объема кристалла, в газах в этом отношении царит полный хаос. Согласно рентгенографическим исследованиям, в отношении расположения частиц, жидкость также занимает промежуточное положение. В расположении частиц жидкости наблюдается так называемый ближний порядок. Это означает, что по отношению к любой частице расположение ближайших к ней соседей является упорядоченными. Однако по мере удаления от данной частицы довольно быстро порядок исчезает.

Молекулы жидкости находятся в компактных пространственных образованиях, плотность которых может быть даже больше кристалла. Эти образования английский ученый Джон Бернал (1901-1971) назвал псевдоядрами (кластерами). Между ядрами существуют большие отверстия, или дырки. Наличие этих «дырок» компенсирует избыточную плотность ядер и приводит к тому, что плотность жидкостей обычно меньше плотности кристалла.

Жидкость, как и газ, *изотропна* (одинаковость свойств по всем направлениям) и *подвижна*.

Советский физик Я. И. Френкель (1894-1952) решил ряд проблем теории жидкого состояния. Согласно Френкелю, тепловое движение в жидкости имеет следующий характер. Каждая молекула в течение некоторого времени называемого *временем оседлой жизни* колеблется около определенного положения равновесия. Время от времени молекула меняет место равновесия, скачком перемещаясь в новое положение, к другому псевдоядру отстоящему от предыдущего на расстоянии порядка разме-

ров самих молекул. Т. о., молекулы медленно перемещаются внутри жидкости, пребывая часть времени около определенных мест.

Для того чтобы частица оторвалась от псевдоядра, она должна обладать кинетической энергией, превосходящей работу, которую нужно затратить на преодоление молекулярных сил притяжения. Эта энергия называется *энергией активации* ε_0 . Чем больше энергия активации, тем меньше вероятность переселения частицы из одного псевдоядра в другое.

Среднее время оседлой жизни определяется выражением:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\alpha \cdot \varepsilon_0}{kT}\right)$$

где τ_0 – время оседлой жизни при $\varepsilon_0 = 0$ (или при неограниченном возрастании температуры, $T \rightarrow \infty$); α – коэффициент, определяемый природой жидкости; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Я. И. Френкель подсчитал, что за 1 сек молекула испытывает 10^{10} перемещений или дрейфов.

Интересные явления наблюдаются в поверхностном слое жидкости. Поверхность жидкости соприкасается с окружающим паром или с воздухом и находится в особых условиях. Молекулы поверхностного слоя взаимодействуют с молекулами двух слоев, имеющих различную плотность. Последнее обстоятельство обуславливает равнодействующую $\vec{f} = \sum \vec{f}_i$ сил, действующих на молекулу в поверхностном слое, направленную внутрь жидкости (рис. 1).

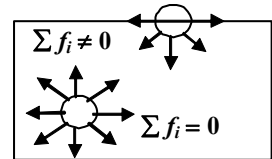


Рис. 1

Таким образом, в поверхности жидкости будут действовать силы, образующие «поверхностное» силовое поле, расположенное в тонком слое. Этот слой имеет толщину порядка 10^{-7} см. Молекулы, находящиеся в этом слое, обладают повышенной потенциальной энергией. Следовательно, при выходе молекул из глубины жидкости на поверхность их энергия возрастает, а при уходе на глубину – убывает. Эти изменения энергии происходят только в поверхностном слое. При изменении формы жидкости и уменьшении ее свободной поверхности, часть молекул с повышенной энергией уходит внутрь жидкости, освобождающаяся при этом энергия расходуется на совершение работы по сокращению свободной поверхности жидкости, а часть энергии переходит в тепло.

Энергия поверхностного слоя, идущая на совершение работы при изотермическом процессе, называется *свободной энергией*, и ее минимум определяет положение устойчивого равновесия. Поэтому при от-

судствии внешних сил, или при их незначительности, поверхность жидкости сокращается и стремится принять форму с минимальной поверхностью, возможной в данных условиях. Например, форма капли жидкости, с уменьшением размера, в поле силы тяжести приближается к сферической из-за незначительности её веса.

Работа A , которую надо совершить, чтобы увеличить площадь свободной поверхности жидкости на единицу $\Delta S = 1 \text{ м}^2$ при постоянной температуре, называется *коэффициентом поверхностного натяжения* или просто *поверхностным натяжением*:

$$\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S}. \quad (1)$$

Рассмотрим случай, когда жидкость существует в форме тонкой пленки, примером которой может служить мыльная пленка. Возьмем проволочный каркас, имеющий форму прямоугольника (рис. 2). Сторона CD каркаса может свободно скользить вдоль направляющих проволок AC и BD . Затянем площадь $ABCD$ мыльной пленкой. Эта пленка двойная. Опыт показывает, что она стремится сократиться, и поэтому перемычка CD приходит в движение. Для удержания перемычки в равновесии к ней надо приложить определенную силу, например, подвесить груз. Так как пленка двойная, то величину этой силы надо удвоить, считая, что на каждую сторону пленки действует сила F . Тогда при перемещении перемычки на расстояние Δx будет совершена работа:

$$A = 2F \Delta x. \quad (2)$$

Площадь поверхности пленки увеличивается на $2l\Delta x = 2\Delta S$, где l – длина перемычки CD ; ΔS – увеличение поверхности одной стороны пленки.

Из определения коэффициента поверхностного натяжения (1) работа A может быть записана в виде:

$$A = 2\sigma \cdot \Delta S = 2\sigma \cdot \Delta x \cdot l \quad (3)$$

Приравняв правые части выражения (2) и (3), получим:

$$\sigma = F/2l$$

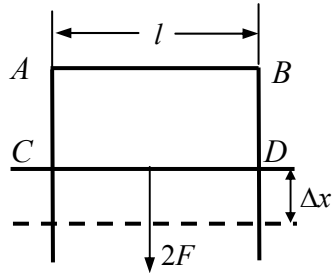


Рис. 2

Поверхностный слой находится в состоянии натяжения. В таком же состоянии находятся свободная поверхность всякой жидкости.

Разрежем мысленно свободную поверхность жидкости вдоль прямой линии. Тогда каждая из половин разрезанной поверхности будет действовать на границу разреза с некоторой силой, распределенной по всей линии. Эта сила направлена по касательной к поверхности и перпендикулярна линии разреза.

Сила, отнесенная к единице длины линии разреза, является коэффициентом поверхностного натяжения.

Описание установки

Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца изображена на рис. 3, и представляет собой упрощенную модель тензиометра французского биофизика Пьера Леконта дю Нуи, впервые предложившего данный метод. На столике *C* установлены рычажные весы на одно из плеч которых прикреплено металлическое кольцо *K*. На столике также находятся два сосуда с водой *A* и *B* соединенные резиновой трубкой *T*. Сосуд *B*, сообщаясь с сосудом *A* с, можно перемещать вверх или вниз.

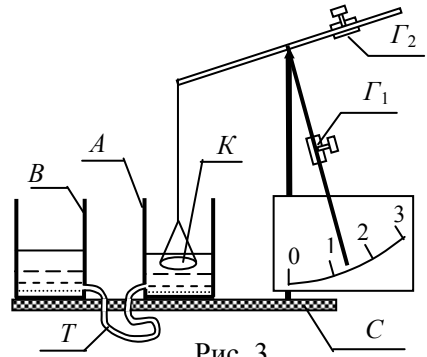


Рис. 3

Коэффициент поверхностного натяжения можно определить, если измерить силу F , которую необходимо приложить, чтобы оторвать тонкое металлическое кольцо K от жидкости.

Для настройки весов используют два подвижных груза с зажимами. Передвижением груза Γ_1 устанавливают стрелку весов на нуль. Грузом Γ_2 , используя эталонный груз, прилагаемый к прибору, нужно установить точное соответствие шкалы весов эталону (тарировка). Если весы отрегулированы, то эти операции производить не нужно.

Нальем воды в сосуды A и B столько, чтобы кольцо K прилипло к поверхности или даже немного погрузилось в воду. Затем осторожно опускаем сосуд B ниже уровня стола. Вода из сосуда A начнет переливаться в сосуд B и уровень воды в ней начнет понижаться. В некоторый момент кольцо оторвется от воды. Шкала весов проградуирована в граммах.

Разрыв поверхностной пленки происходит по линии длиной

$$2l = 2\pi D. \quad (5)$$

Возникает вопрос. Почему берется двойная длина кольца? Разрыв происходит по двухсторонней пленке. Т. е. пленке, имеющей две поверхности, внутри и вне кольца.

Подставив в соотношение (4) силу отрыва, равную весу затянутой под поверхностную пленку жидкости, получим:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi D}. \quad (6)$$

где $D = 45$ мм – диаметр кольца. Формула (6) является расчетной.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу

№	m	σ	$\bar{\sigma}$	ε	$\Delta\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma} \pm \Delta\bar{\sigma}$
1						
2						
3						
4						
5						

2. Налить в сосуды A и B воды, чтобы кольцо было ниже уровня воды на $2 \div 3$ мм. Весы при этом должны показывать «нуль».
3. Осторожно опустить сосуд B ниже уровня стола. Уровень воды в сосуде A будет понижаться. В момент отрыва кольца заметить показания весов (предел шкалы 3 г). Эти показания занести в таблицу.
4. Опыт повторить не менее 5 раз, заносая результаты в таблицу.
5. По формуле (8) вычислить коэффициент поверхностного натяжения.
6. Вычислить относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta D}{D}$$

7. Вычислить абсолютную погрешность $\Delta\sigma = \varepsilon \bar{\sigma}$.
8. Результат записать в виде: $\bar{\sigma} \pm \Delta\bar{\sigma}$.
9. Сравнить полученное значение коэффициента поверхностного натяжения с табличным. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое «ближний порядок» и «дальний порядок»?
2. Объяснить характер теплового движения молекул жидкости.
3. Почему молекулы, находящиеся на поверхности, обладают большей энергией, чем молекулы внутри жидкости?
4. Почему существуют силы поверхностного натяжения и как они направлены?
5. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения. В каких единицах он измеряется.
6. Почему поверхностное натяжение зависит от среды, с которой граничит жидкость.
7. При каких условиях капля жидкости принимает форму шара.
8. Почему в формуле (6) стоит удвоенная длина окружности кольца?
9. Вывести расчетную формулу (6).
10. Опишите установку и порядок проведения эксперимента.

Лабораторная работа № 16

Распределение Максвелла

Цель работы: Экспериментальное получение распределения Максвелла и сравнение с теоретическим.

Краткая теория

Пусть имеется сосуд, содержащий N молекул газа при температуре T . Задача нахождения закона распределения скоростей ставится так: найти долю числа молекул $\Delta N_v / N$, или число молекул ΔN_v , имеющих скорости, заключенные между значениями v и $v + \Delta v$.

Для упрощения рассуждений в статистической физике вводится абстрактное понятие *фазового пространства*. В нашем случае события рассматриваются в фазовом пространстве скоростей. Координатами точки этого пространства являются компоненты скорости молекул v_x , v_y , v_z . Молекулы, имеющие скорости в пределах от v до $v + \Delta v$, попадают в область, лежащую между сферами радиусов v и $v + \Delta v$. Объем этой области равен $4\pi v^2 \Delta v$. Число молекул ΔN_v попадающих в эту область, равно:

$$\Delta N_v = Nf(v)4\pi v^2 \Delta v, \quad (1)$$

здесь $Nf(v)$ – плотность точек в пространстве скоростей. Величина

$$F(v) = f(v)4\pi v^2 \quad (2)$$

называется *функцией распределения молекул по скоростям*.

Вид этой функции был теоретически получен Максвеллом в 1859 году.

$$F(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) v^2, \quad (3)$$

где m – масса молекулы, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Подставив (3) в (1) и учтя (2), получим:

$$\Delta N_v = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) v^2 \Delta v. \quad (4)$$

Это выражение полностью решает поставленную задачу.

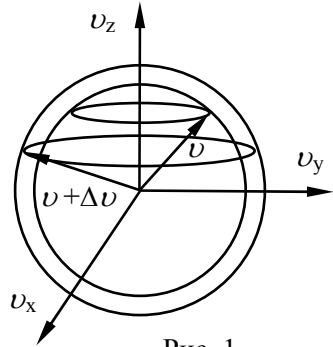


Рис. 1

Распределение Максвелла имеет более удобный вид, если ввести относительную скорость:

$$u = v/v_{\text{pr}},$$

где v – данная скорость, а v_{pr} – наиболее вероятная скорость при данной температуре T .

Наиболее вероятная скорость определяется формулой:

$$v_{\text{pr}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Преобразуем формулу (4), введя в нее относительную скорость:

$$\Delta N_v = 4\pi N \left(\frac{1}{\pi v_{\text{pr}}^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \left(\frac{v}{v_{\text{pr}}} \right)^2 \right) \left(\frac{v}{v_{\text{pr}}} \right)^2 \Delta \left(\frac{v}{v_{\text{pr}}} \right) v_{\text{pr}}^3.$$

Откуда следует:

$$\Delta N_u = \frac{4}{\sqrt{\pi}} N e^{-u^2} u^2 \Delta u. \quad (5)$$

Функция распределения молекул $F(v)$ в зависимости от относительной скорости u приобретает вид:

$$F(u) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2. \quad (6)$$

График функции $F(u)$ представлен на рис. 2.

Площадь, охватываемая кривой $F(u)$ и осью абсцисс равна 1.

$$\int_0^{\infty} \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 du = 1. \quad (7)$$

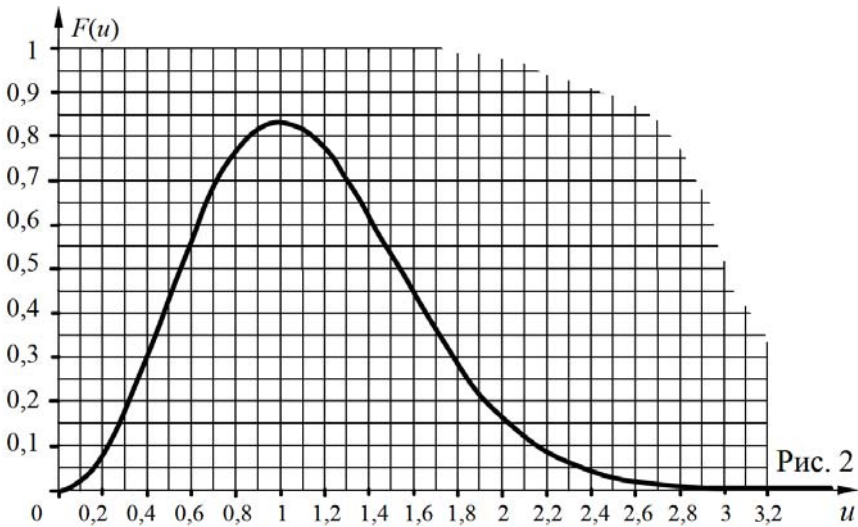
Выражение (7) называется *условием нормировки*.

Функция $F(u)$, как видно из графика (рис. 2), асимметрична.

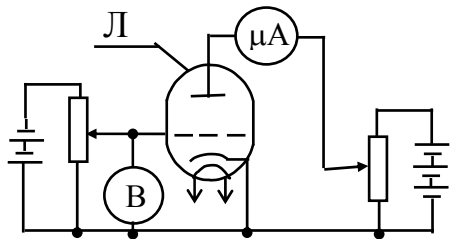
Экспериментальная установка

В лабораторной работе предлагается экспериментально исследовать распределение скоростей электронов, вылетающих из раскаленного катода электронной лампы.

Схема (рис. 3) состоит из электронной лампы Л, источников питания, микроамперметра μA , вольтметра В.



В результате термоэлектронной эмиссии пространство между управляющей сеткой и катодом заполнится электронным газом. «Молекулы» этого газа (электроны) имеют всевозможные скорости от нуля до максимальной скорости v_{max} . Перед нами стоит задача экспериментально исследовать зависимость распределения электронов по скоростям, т. е. выяснить какое количество электронов имеют ту или иную скорость.



Электроны, находящиеся в пространстве между сеткой и катодом, при не очень больших отрицательных напряжениях на сетке, могут преодолевать потенциальный барьер, созданный отрицательным напряжением на сетке, и достигать анода. В цепи анод-катод протекает ток.

Если бы мы могли поставить на пути электронов такой фильтр, который пропускал только электроны в интервале скоростей Δv , то сразу решили поставленную задачу. Однако такой возможностью мы не располагаем.

Мы можем создать «фильтр», который пропускает электроны из области между сеткой и катодом от некоторой минимальной скорости v_3 до максимальной v_{max} , а затем, специальным образом обработав результаты измерений, установим закон распределения электронов по скоростям. Таким своеобразным «фильтром» является управляющая сетка на

которую можно подавать различные задерживающие (отрицательные относительно катода) потенциалы U_{cut} .

На анод, при некотором задерживающем потенциале U_{cut} , могут проникнуть все электроны, кинетическая энергия которых удовлетворяет условию

$$\frac{mv^2}{2} \geq eU_{cut}.$$

Микроамперметр (μA), включенный в анодную цепь лампы, регистрирует ток, созданный электронами со скоростями v лежащими в пределах $v_{cut} < v < v_{max}$. В последнем выражении $v_{cut} = \sqrt{2eU_{cut}/m}$ – минимальная скорость электронов, пропускаемых сеткой.

То есть $v_{cut} \sim \sqrt{U_{cut}}$.

Электроны же со скоростями $v < v_{cut}$ управляющей сеткой не пропускаются.

Количество электронов, достигающих анода в единицу времени, найдем путем интегрирования выражение (1) от v_{cut} до v_{max} . Скорость $v_{max} \gg v_{pr}$ поэтому верхний предел интеграла можно положить равным бесконечности.

$$N_v = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_{v_{cut}}^{\infty} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2 dv \quad (9)$$

Каждый электрон несет элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, поэтому полный заряд, переносимый N_v электронами за единицу времени, т. е. ток будет:

$$I = eN_v = 4\pi eN \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_{v_{cut}}^{\infty} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2 dv. \quad (10)$$

Ток в цепи является функцией от v_{cut} , поэтому, если от выражения (10) взять производную по нижнему пределу, то получим:

$$\frac{dI}{dv} = -4\pi eN \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2. \quad (11)$$

Мы видим, что с точностью до некоторой постоянной выражение (11) совпадает с функцией распределения Максвелла (3).

Поскольку $v_{cut} \sim \sqrt{U_{cut}}$, то отсюда следует практический вывод. Чтобы получить распределение Максвелла необходимо снять эксперимен-

тальную зависимость $I = f(\sqrt{U_{cut}})$, затем эту зависимость продифференцировать по $\sqrt{U_{cut}}$.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу 1.

Таблица 1

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{cut} (В)	0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	1
$\sqrt{U_{cut}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
I (μА)											

2. Значения напряжения U_{cut} на управляющей сетке выбраны такими для того, чтобы удобно было дифференцировать экспериментальную кривую.
3. Включить прибор в сеть и дать прогреться не менее 5 минут.
4. Произвести измерения тока анода I при указанных напряжениях на сетке U_{cut} и занести в таблицу. Вначале необходимо определить цену деления прибора. Цена деления зависит от верхнего и нижнего пределов используемого прибора. Приборы, используемые в установке рассчитаны на измерение постоянного тока в пределах от 0 до 300 μА. Шкала прибора имеет 60 делений. Цена деления такого прибора равна $300/60 = 5 \mu\text{A}/\text{V}$. При измерении тока анода I отсчет показаний производится непосредственно по шкале прибора.

На основе второго микроамперметра, установленного в приборе, создан многопредельный прибор который служит для измерения запирающего напряжения U_{cut} . Нижний предел измерения смещается переключателем. Пределы измерения напряжения указаны у стрелки переключателя и имеют диапазоны: $0 \div 0,3$; $0,3 \div 0,6$; $0,6 \div 0,9$; $0,9 \div 1,2$ В. Пределы шкалы прибора составляют $0 \div 0,3$ В. Цена деления $0,3/60 = 0,005$ В.

Первое измерение тока произвести при $U_{cut} = 0$. Второе – при $U_{cut} = 0,01$ В. $0,01$ В соответствует двум делениям шкалы. Третье измерение произвести при $U_{cut} = 0,04$ В. Это соответствует 8 делениям шкалы прибора. При установке напряжения на сетке $U_{cut} = 0,36$ В необходимо сделать первое переключение, чтобы увеличить нижний предел измерения на $0,3$ В. И так далее до 1 В.

Для обработки экспериментальных результатов подготовить таблицу

2. В первой строке таблицы указан номер обрабатываемой точки. Во второй строке абсцисса точки. Например, абсцисса первой точки находится посередине интервала значений от 0 до 0,1. (см. третью строку

табл. 1). В третью строчку табл. 2 занести значения приращений тока двух соседних точек $\Delta I_N = I_N - I_{N-1}$.

Таблица 2

1	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	x	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
3	ΔI_N										
4	$F(u)_{exp}$										
5	u_{exp}										

Далее необходимо нормировать значения приращений тока. Для этого разделите каждое значение приращения ΔI_N на максимальное значение ΔI_{max} и помножьте на 0,8302. (Найдите значение 0,8302 в табл. 3. Какому значению u оно соответствует?). В этом случае максимум экспериментальной кривой $F(u)_{exp} = \frac{\Delta I_N}{\Delta I_{max}} \cdot 0,8302$ совпадет с максимумом кривой на рис. 2. Результаты занести в четвертую строку табл. 2.

Наиболее вероятная скорость – это скорость при которой функция распределения достигает максимума. Относительная скорость $u = v/v_{pr}$ в этой точке $u = 1$.

Нормируем значения $\sqrt{U_{cut}}$ кривой. Найдем в строке 3 табл. 2 x_{max} при которой ΔI_N достигает максимального значения и обозначим ее через ΔI_{max} . В пятую строчку занесем значения $u_{exp} = x/x_{max}$.

5. Скопируйте в протокол график на рис. 2. Для построения графика можно использовать значения $F(u)$ из табл. 3.

6. Нанести на этот рисунок значения экспериментальных точек $F(u)_{exp}$. (четвертая строчка табл. 2) Абсциссы экспериментальных точек (u_{exp}) находятся в пятой строчке табл. 2. Сделать выводы.

Таблица 3

u	$F(u)$	u	$F(u)$	u	$F(u)$	u	$F(u)$	u	$F(u)$
0	0	0,6	0,5668	1,2	0,77	1,8	0,2864	2,4	0,041
0,1	0,0223	0,7	0,6774	1,3	0,7037	1,9	0,2204	2,5	0,0272
0,2	0,0867	0,8	0,7616	1,4	0,6231	2	0,1653	2,6	0,0177
0,3	0,1856	0,9	0,8132	1,5	0,5352	2,1	0,121	2,7	0,0112
0,4	0,3077	1	0,8302	1,6	0,4466	2,2	0,0864	2,8	0,007
0,5	0,4394	1,1	0,8143	1,7	0,3625	2,3	0,0602	2,9	0,004

Контрольные вопросы

1. Чему равны: наиболее вероятная скорость, среднеквадратичная скорость, средняя арифметическая скорость?
2. Дайте определение относительной скорости.
3. Запишите выражение для функции распределения Максвелла в зави-

симости от относительной скорости.

4. При какой относительной скорости функция распределения достигает максимума. Чему равно значение функции распределения в максимуме?
5. Нарисуйте схему экспериментальной установки. От чего зависит температура электронного газа между катодом и сеткой.
6. Объясните сущность метода экспериментального определения распределения Максвелла.
7. Электроны с какими скоростями достигают анода при запирающем напряжении на сетке U_{cut} ?
8. Как из зависимости анодного тока от $\sqrt{U_{cut}}$ получить функцию распределения Максвелла?
9. Как определить цену деления измерительных приборов, используемых в установке?
10. Используя экспериментальные данные оцените численное значение наиболее вероятной скорости электронов.
11. Как зная наиболее вероятную скорость определить температуру катода лампы.
12. Объясните причину расхождения теоретической и экспериментальной зависимости распределения Максвелла.

Лабораторная работа № 17

Исследование электростатического поля

Цель работы: Экспериментально исследовать электростатическое поле с помощью электролитической ванны. Построить картину электростатического поля с помощью линий равного потенциала и силовых линий.

Принцип работы экспериментальной установки

Обычно электростатическое поле исследуется путем перемещения в нем измерительных зондов. Однако электростатические измерения сопряжены с определенными трудностями, поскольку зонды, вносимые в электростатическое поле, искажают это поле. Вокруг зондов, чтобы уменьшить искажения, создается ионизация газа, например, с помощью газовой горелки.

Выход может быть найден в замене электростатического поля неподвижных зарядов полем постоянного электрического тока.

Установка для изучения картины электростатического поля состоит из электролитической ванны (ЭВ), наполненной водопроводной водой, являющейся слабым электролитом. В ванну помещены два электрода

(\mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2) (рис. 1). Изучению подлелжит электростатическое поле, создаваемое этими электродами.

Для измерения потенциала в любой точке поля вводится зонд (3). В цепь между зондом и переключателем (П) включается гальванометр (G).

Батарея (Б) создает напряжение 6 В. Делитель напряжения состоит из шести одинаковых резисторов с сопротивлениями по 1 кОм, т. е. падение напряжения на каждом резисторе составляет 1 В.

Переключатель имеет шесть положений. При переключении на одну позицию напряжение изменяется на 1 В, т. е. в положении «0» – 0 В, в положении «1» – 1 В и так далее до 6 В. Если переключатель установлен в каком-то положении, на рисунке это положение «2», то на движок переключателя подается напряжение 2 В.

Электролит в ванне является высокоомным проводником. При протекании по нему электрического тока произойдет распределение потенциала. Передвигая зонд по ванне необходимо найти и отметить все точки, в которых потенциал равен потенциалу на движке переключателя. При равенстве напряжений на зонде и движке переключателя гальванометр покажет «нуль». Главная экспериментальная трудность этого метода состоит в возникновении поляризации электродов, что приводит к искажению поля с течением времени. Чтобы устранить вредное влияние поляризации вместо постоянного тока используется переменный.

Порядок выполнения работы

1. Установить электроды в ванне. Их расположение указываются преподавателем или лаборантом.
2. Заготовить на тетрадном листе в клетку чертеж с декартовой системой координат, подобной той, которая находится в электролитической ванне, и нанести на нее электроды.
3. Переключатель установить в положение «1».
4. Включить установку в сеть.
5. Перемещая зонд, отыскивают точки поля, в которых гальванометр показывает минимальное значение. Найденные точки отмечают на чертеже. Количество точек должно быть таким, чтобы можно было начертить гладкую кривую. Это будет первая эквипотенциальная поверхность. После прочерчивания кривой записать рядом с ней значение потенциала (1 В).

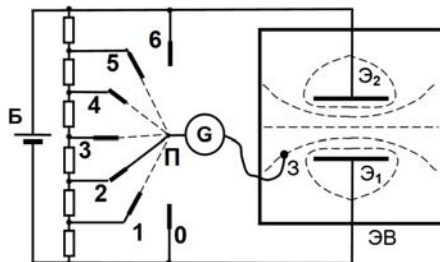


рис. 1

6. Установить переключатель в положение «2» и проделать указания к пункту «5». Записать рядом с кривой значение потенциала (2 В).
7. Устанавливая последовательно переключатель в положения «3», «4», «5» снять все пять эквипотенциальных поверхностей.
8. На этот же чертеж нанести семейство силовых линий. Напомним, что силовые линии во всех точках пересечения ортогональны эквипотенциальным линиям.
9. В некоторых точках поля, по указанию преподавателя, определить напряженность поля по формуле:

$$E_{\max} = \Delta\varphi/\Delta r,$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями, Δr – кратчайшее расстояние между ними. В нашей установке разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями $\Delta\varphi = 1$ В.

Контрольные вопросы

1. Что означает атомистичность электрического заряда?
2. Чему равен элементарный электрический заряд?
3. Сформулируйте закон Кулона. Как изменится сила взаимодействия между точечными зарядами, если расстояние между ними увеличить в два раза.
4. В каких единицах в системе СИ измеряется заряд? Относится ли единица заряда в системе СИ к основным?
5. Назовите основные характеристики электрического поля.
6. Как определить напряженность электрического поля в некоторой точке? В каких единицах она измеряется?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
8. Дайте определение понятия силовой линии.
9. Как определить потенциал в некоторой точке поля? Единицы его измерения.
10. Как вычислить работу по перемещению заряда в электростатическом поле? Зависит ли работа от формы траектории?
11. Что такое эквипотенциальная поверхность?
12. Выведите формулу связи напряженности и потенциала.
13. Как на систему эквипотенциальных линий нанести систему силовых линий напряженности?
14. Сформулируйте теорему Остроградского-Гаусса.
15. Примените данную теорему для нахождения напряженности электрического поля, созданного заряженными телами простой геометрической формы.

Лабораторная работа № 18

Увеличение пределов измерения электроизмерительных приборов

Цель работы: Расширение пределов измерения и градуировка электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы.

Измерение силы тока

Для измерения силы тока используют амперметры, включаемые в электрическую цепь последовательно. Чтобы не вносить больших изменений в параметры цепи, их изготавливают с возможно малым внутренним сопротивлением. Для расширения пределов измерений параллельно к миллиамперметру присоединяется резистор, называемый *шунтом*.

Расчет шунта

Цепь (рис. 1) из миллиамперметра G с внутренним сопротивлением R_0 и шунта сопротивлением $R_{ш}$ содержит два узла a и b . R_H – нагрузочное сопротивление, его роль выполняет сопротивление соединительных проводов.

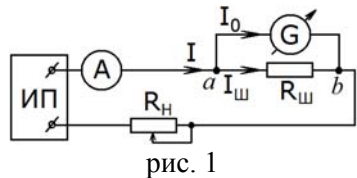


рис. 1

Сопротивление шунта найдем, воспользовавшись законом Ома:

$$R_{ш} = U_{AB} / I_{ш}. \quad (1)$$

По первому правилу Кирхгофа сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю. Запишем уравнение для узла A .

$$I - I_0 - I_{ш} = 0 \Rightarrow I_{ш} = I - I_0. \quad (2)$$

Между узлами A и B напряжение определяется падением напряжения на внутреннем сопротивлении миллиамперметра.

$$U_{AB} = I_0 \cdot R_0, \quad (3)$$

Подставим (2) и (3) в (1): $R_{ш} = \frac{I_0 R_0}{I - I_0}$. Разделим числитель и знамена-

тель на ток I_0 полного отклонения прибора: $R_{ш} = \frac{R_0}{I/I_0 - 1}$.

Обозначим через $N = I/I_0$, тогда

$$R_{ш} = \frac{R_0}{N - 1}. \quad (4)$$

Пусть вся шкала измерительного прибора рассчитана на ток I_0 , и нам необходимо увеличить пределы измерения в N раз, тогда к нему необходимо подсоединить шунт, рассчитанный по формуле (4).

Расчет добавочного сопротивления

Вольтметр включается в цепь параллельно (рис. 2) и, чтобы не вносить существенных искажений в значения измеряемых величин, должен иметь большое сопротивление.

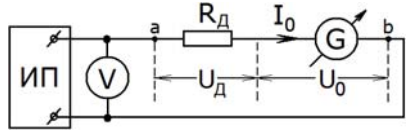


рис. 2

Для увеличения пределов измерения, последовательно с прибором, включают добавочное сопротивление R_d .

Измеряемое напряжение U между точками a и b связано с током полного отклонения гальванометра I_0 и его внутренним сопротивлением соотношением:

$$U = I_0 \cdot (R_d + R_0) \Rightarrow R_d = \frac{U}{I_0} - R_0. \quad (5)$$

Если известно значение предела измерения напряжения

$$U_0 = I_0 \cdot R_0, \quad \Rightarrow \quad R_0 = U_0 / I_0, \quad (6)$$

то можно ввести число $N = U/U_0$, показывающее во сколько раз мы хотим увеличить пределы измерения прибора. Формулу (6) можно преобразовать:

$$R_d = \frac{U_0 N}{I_0} - R_0 = R_0(N - 1). \quad (7)$$

При подключении добавочного сопротивления, рассчитанного по формуле (7) напряжение полного отклонения возрастет в N раз.

Экспериментальная установка

Установка включает в себя три блока:

- а) образцового (эталонного) многопредельного прибора, который может работать в режиме амперметра или вольтметра;
- б) испытуемого миллиамперметра (гальванометра), к которому в зависимости от назначения может подключаться шунт или добавочное сопротивление;
- в) регулируемого источника питания;
- г) декадного магазина сопротивлений, выполняющего роль шунта или добавочного сопротивления.

Порядок выполнения работы

Опыт 1. Шунтирование амперметра

1. Заготовить таблицу по указанному образцу, предварительно согласовав с преподавателем число делений шкалы испытуемого гальванометра ($N_{\text{шк}}$).

параметры	пределы измерения		расчет сопротивлений	деления шкалы $N_{шк}$	0	15	30	45	60	75
$R_0 =$ $I_0 = I_0 \cdot R_0 =$ $U_0 =$	ток (мА)			показания эталонного амперметра (мА)						
	напряжение (В)			показания эталонного вольтметра (В)						

- Собрать схему по рис. 1.
- Рассчитать сопротивление шунтов к исследуемому гальванометру для пределов, указанных преподавателем, по формуле (4). Уточнить также внутреннее сопротивление R_0 и ток полного отклонения I_0 , значения занести в таблицу.
- Установить на декадном магазине сопротивлений одно из расчетных значений сопротивления шунта к гальванометру.
- Регулятор напряжения установить в крайнее левое положение. После проверки схемы преподавателем включить источник питания.
- Поворотом ручки регулятора установить стрелку исследуемого прибора в положение полного отклонения, при этом эталонный прибор должен показать расчетный предел измерения тока или близкий к нему. Показания эталонного прибора занести в таблицу в соответствующую клетку.
- Далее плавно уменьшая напряжение установить стрелку исследуемого прибора на следующее по порядку деление шкалы, соответствующее показание эталонного прибора занести в таблицу, и т. д. до нулевого значения.
- Установить на декадном магазине сопротивлений следующее расчетное значение сопротивления шунта и проделать пункты 6 и 7.
- Построить градуировочные графики зависимости $I_{эт} = f(N_{шк})$ для каждого шунта на одной координатной сетке. По оси ординат откладывать значения, снимаемые с эталонного прибора, по оси абсцисс число делений шкалы исследуемого прибора.

Опыт 2. Расширение пределов измерения вольтметра

- Собрать схему по рис. 2.
- Рассчитать добавочные сопротивления к исследуемому гальванометру для пределов, указанных преподавателем, по формуле (7). Предварительно рассчитав напряжение полного отклонения U_0 по известно-

му внутреннему сопротивлению R_0 и току полного отклонения I_0 , значение занести в таблицу.

3. Установить на декадном магазине сопротивлений одно из расчетных значений добавочного сопротивления.
4. Регулятор напряжения установить в крайнее левое положение. После проверки схемы преподавателем включить источник питания.
5. Поворотом ручки регулятора установить стрелку исследуемого прибора в положение полного отклонения, при этом эталонный прибор должен показать расчетный предел измерения напряжения или близкий к нему. Показания эталонного прибора занести в таблицу в соответствующую клетку.
6. Далее плавно уменьшая напряжение установить стрелку исследуемого прибора на следующее по порядку деление шкалы, соответствующее показание эталонного прибора занести в таблицу, и т. д. до нулевого значения.
7. Установить на декадном магазине сопротивлений следующее расчетное значение добавочного сопротивления и проделать пункты 6 и 7.
8. Построить градуировочные графики зависимости $U_{\text{эт}} = f(N_{\text{шк}})$ для каждого шунта на одной координатной сетке. По оси ординат откладывать значения, снимаемые с эталонного прибора, по оси абсцисс число делений шкалы исследуемого прибора.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий: сила тока, напряжение, ЭДС.
2. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.
3. По какой формуле определяется сопротивление проводника постоянного сечения. Какие величины входят в эту формулу?
4. Объясните природу электрического сопротивления с точки зрения классической элементарной теории электропроводности.
5. Запишите закон Ома для замкнутой цепи.
6. Сформулируйте правила Кирхгофа.
7. Выведите формулу для расчета шунта.
8. Выведите формулу для расчета добавочного сопротивления.
9. Как на практике применяются градуировочные графики?
10. Чему равен тангенс угла наклона линий на графиках?
11. Чему равно внутреннее сопротивление идеального амперметра и идеального вольтметра?

Лабораторная работа № 19

Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона

Цель работы: Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона.

Теория метода

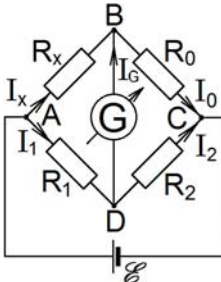


рис. 1

Добиться высокой точности измерений величин сопротивлений и значительно упростить расчеты можно, применяя методы, в основу которых положены различные варианты мостовых схем.

Общая схема моста постоянного тока (моста Уитстона) для измерения сопротивления проводников (рис. 1) состоит из четырех сопротивлений R_0 , R_1 , R_2 , R_x , образующих плечи моста, в одну из диагоналей которого включен источник постоянного тока ε , а в другую – нуль-гальванометр (микроамперметр с нулевой отметкой в середине шкалы) G . Выберем направления токов согласно первому правилу Кирхгофа. Будем иметь для узла В и узла D соответственно:

$$I_0 = I_G + I_x; \quad I_1 = I_G + I_2. \quad (1)$$

По второму правилу Кирхгофа имеем для контуров ABD и BCD

$$I_1 R_1 + I_G R_G - I_x R_x = 0; \quad I_G R_G + I_0 R_0 - I_2 R_2 = 0. \quad (2)$$

При определенных соотношениях величин сопротивлений в плечах моста можно добиться его баланса, т. е. отсутствия тока через нуль-гальванометр. Баланс моста достигается изменением величины сопротивления в одном из плеч моста. Решая совместно (1) и (2) и учитывая, что при балансе моста $I_G = 0$, получим

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0. \quad (3)$$

Описание установки с реохордом

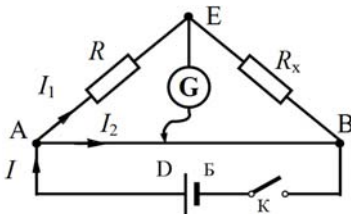


рис. 2

Мостовая схема данной конструкции состоит из реохорда AB , чувствительного гальванометра G и двух сопротивлений – известного R и неизвестного R_x (рис. 2). Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт D . Перемещая контакт D при заданных значениях R и R_x добиваются баланса моста.

Данных значениях R и R_x добиваются баланса моста.

Так как сопротивления участков AD и DB пропорциональны их длинам l_1 и l_2 , то согласно формуле (3) $R_x = R \cdot (l_1/l_2)$. Если длина всего реохорда l , то $l_2 = l - l_1$ и тогда

$$R_x = R \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (4)$$

Эта формула является расчетной при выполнении лабораторной работы.

Так как сопротивление реохорда сравнительно невелико, то мост Уитстона описанного типа применяется, как правило, для измерения небольших сопротивлений (от 1 до 100 Ом).

В данной лабораторной установке используются два магазина сопротивлений. На магазине, установленном слева (рис. 3), всего два резистора: $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 20$ Ом. С помощью штекера, вставляемого в гнезда «1» или «2» можно устанавливать три значения эталонных сопротивлений: $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 30$ Ом.

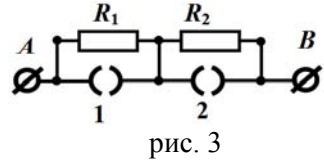


рис. 3

Второй магазин сопротивлений (рис. 4) такого же типа. В нем также установлено два резистора R_{x1} и R_{x2}

значения которых необходимо измерить. С помощью двух штекеров, вставляемых в гнезда «1» – «5», к выходным клеммам (А, В) этого магазина можно подключать либо резистор R_{x1} или R_{x2} , либо их последовательное или параллельное соединение. В схеме коммутации резисторов

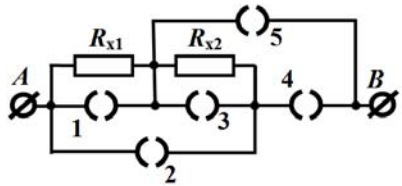


рис. 4

разобраться самостоятельно.

Оценка погрешности

Найдем относительную погрешность измерений. Прологарифмируем (4)

$$\ln R_x = \ln R + \ln l_1 - \ln(l - l_1).$$

Дифференцируем и меняем «минусы» на «плюсы», дифференциалы заменяем на приращения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_1}{l - l_1}. \quad (5)$$

Найдем условие, при котором относительная погрешность будет минимальной. Приведем (5) к общему знаменателю.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R l_1 (l_1 - l) + R \Delta l_1 (2l_1 - l)}{R l_1 (l_1 - l)}$$

Относительная погрешность будет минимальной, когда знаменатель будет максимальным. Найдем условие максимума знаменателя. Обозначим знаменатель как функцию $f(l_1) = R \cdot l_1 (l - l_1)$. Найдем максимум этой функции:

$$\frac{df(l_1)}{dl_1} = Rl - 2Rl_1 = 0 \Rightarrow l_1 = \frac{l}{2}$$

Погрешность будет минимальной, когда при нулевых показаниях гальванометра ползунок будет находиться на середине реохорда!

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу измерений.

	l_1	$l_2 = l - l_1$	$R_{\text{эт}}$ (Ом)	R_{x1}	$\langle R_{x1} \rangle$	ΔR_{x1}	$\langle \Delta R_{x1} \rangle$	$\langle R_{x1} \rangle \pm \langle \Delta R_{x1} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					
	l_1	$l_2 = l - l_1$	$R_{\text{эт}}$ (Ом)	R_{x2}	$\langle R_{x2} \rangle$	ΔR_{x2}	$\langle \Delta R_{x2} \rangle$	$\langle R_{x2} \rangle \pm \langle \Delta R_{x2} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					
	l_1	$l_2 = l - l_1$	$R_{\text{эт}}$ (Ом)	$R_{\text{пос}}$	$\langle R_{\text{пос}} \rangle$	$\Delta R_{\text{пос}}$	$\langle \Delta R_{\text{пос}} \rangle$	$\langle R_{\text{пос}} \rangle \pm \langle \Delta R_{\text{пос}} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					
	l_1	$l_2 = l - l_1$	$R_{\text{эт}}$ (Ом)	$R_{\text{пар}}$	$\langle R_{\text{пар}} \rangle$	$\Delta R_{\text{пар}}$	$\langle \Delta R_{\text{пар}} \rangle$	$\langle R_{\text{пар}} \rangle \pm \langle \Delta R_{\text{пар}} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					

- Установить на магазине эталонных сопротивлений (правом) $R_1 = 10$ Ом. (Вставить штекер в гнездо «2»).
- С помощью двух штекеров установить на левом магазине R_{x1} , вставив штекеры в гнезда «2» и «3».
- Передвигая движок реохорда добиться нулевых показаний гальванометра. В случае, когда гальванометр показывает «нуль» наступает баланс моста.
- При условии баланса моста занести значения l_1 и l_2 в таблицу. Значение $l_2 = l - l_1$. В нашей установке реохорд имеет длину $l = 0,475$ м.

6. Установить второй эталонный резистор $R_2 = 20$ Ом. На правом магазине установить штекер в гнездо «1» и проделать указания пунктов 2-4.
7. Установить эталонный резистор $R_3 = 30$ Ом. Штекер не используется. Проделать указания пунктов 2-4.
8. Установить второй измеряемый резистор R_{x2} , находящийся в правом магазине, вставив штекеры в гнезда «1» и «3». Проделать указания пунктов 3-6.
9. Соединить резисторы R_{x1} и R_{x2} последовательно. (При последовательном соединении используется только один штекер. Вставить его в гнездо «3»). Проделать указания пунктов 3-6.
10. С помощью двух штекеров соединить резисторы R_{x1} и R_{x2} параллельно. (Вставить штекеры в гнезда «4» и «5»). Проделать указания пунктов 3-6. Каждый резистор измеряется при трех значениях эталонных сопротивлений.
11. Используя формулу (4) рассчитать значения сопротивлений, найти средние значения вычисленных величин и занести в таблицу.
12. Проверить формулы (6) для последовательного и параллельного соединения проводников. Сравнить со значениями, полученными экспериментально, и сделать выводы.

$$R_{\text{пос}} = R_{x1} + R_{x2}; \quad R_{\text{пар}} = \frac{R_{x1}R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}}. \quad (6)$$

Установка с дискретным делителем

Сопротивления R_1 и R_2 в данной установке представляют набор калиброванных резисторов, соединенных последовательно. Сопротивления этих резисторов одинаковы и равны R , тогда соотношение R_1/R_2 будет равно отношению числа резисторов N_1 , в плече 1 к числу резисторов N_2 в плече 2, т. к. $R_1 = N_1R$ и $R_2 = N_2R$, или

$$R_1/R_2 = N_1/N_2$$

Подставляя полученное соотношение в (3), получим

$$R_x = \frac{N_1}{N_2} R_0 \quad (7)$$

В качестве R_0 используется декадный магазин сопротивлений. Соотношение N_1/N_2 устанавливается включением штекера в соответствующее гнездо делителя.

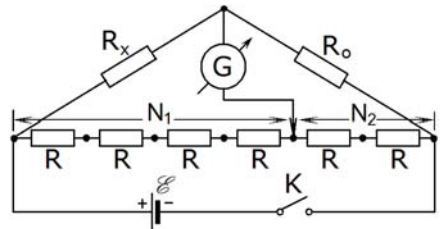


рис. 5

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 5.
2. Установить одно из возможных соотношений плеч делителя.
3. При включенном источнике тока подбором R_0 на декадном магазине сопротивлений добиться баланса моста.
4. Опыт провести для трех различных соотношений плеч делителя.
5. Заменяя исследуемый резистор другим, а затем двумя последовательно и параллельно соединенными, добиться баланса моста при выбранных ранее соотношениях плеч делителя.
6. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

	N_1	N_2	R_0	R_x	ΔR_x	$\Delta R_x / R_x$
Резистор R_{x1}						
	средние значения					
Резистор R_{x2}						
	средние значения					
Последоват. соединение $R_{x1} \blacksquare \blacksquare R_{x2}$						
	средние значения					
Параллельн. соединение $R_{x1} = R_{x2}$						
	средние значения					

7. Используя формулу (7), получить средние значения сопротивлений резисторов R_{x1} и R_{x2} , а так же эквивалентное сопротивление их последовательного и параллельного соединения.
8. Найти эквивалентные сопротивления соединений резисторов R_{x1} и R_{x2} по формулам (6) и сравнить с экспериментальными значениями $\{R_{x1} \blacksquare \blacksquare R_{x2}\}$ и $\{R_{x1} = R_{x2}\}$. Сделать выводы.
9. Оценить погрешности измерений.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий: сила тока, плотность тока, напряжение, ЭДС.
2. В каких единицах в системе СИ измеряются: электрический заряд, сила тока, плотность тока, сопротивление, проводимость, разность потенциалов, напряжение, ЭДС, энергия, работа, теплота.
3. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.
4. Сформулируйте правила Кирхгофа.

5. Выведите формулу (3) из условия баланса моста.
6. Выведите формулу для нахождения общего сопротивления при последовательном и параллельном соединении проводников.
7. Изменится ли баланс моста, если источник тока и нуль-гальванометр поменять местами? Провести вывод рабочей формулы в этих случаях и сравнить результаты.
8. При каком соотношении плеч делителя получается наибольшая точность измерений? Проанализируйте формулу относительной погрешности измерений.
9. Как произвести оценку абсолютной и относительной погрешностей измерения сопротивления проводника, используя рабочую формулу?
10. Какие методы измерения сопротивления проводников Вам известны? Приведите схемы и выведите расчетные формулы.

Лабораторная работа № 20

Исследование электровакуумного триода

Цель работы: Изучить приборы, работающие на основе явления термоэлектронной эмиссии. Экспериментально определить параметры электровакуумного триода.

Параметры электровакуумного триода

Параметрами электродной лампы называются величины, определяющие ее свойства и пригодность для тех или иных целей.

Анодный ток I_a трехэлектродной лампы является функцией двух переменных: анодного напряжения U_a и сеточного напряжения U_c , поэтому полный дифференциал анодного тока I_a равен

$$dI_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right) dU_a + \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right) dU_c. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что изменение анодного тока может быть вызвано как изменением анодного dU_a , так и сеточного dU_c напряжений.

1. Величина $R_i = (\partial U_a / \partial I_a)_{U_c = \text{const}}$ называется *дифференциальным внутренним сопротивлением* лампы. Внутреннее сопротивление R_i показывает на сколько вольт надо изменить напряжение на аноде лампы, чтобы ее анодный ток изменился на 1 А при неизменном напряжении на управляющей сетке.

2. *Крутизна* сеточной характеристики $S = (\partial I_a / \partial U_c)_{U_a = \text{const}}$ – показывает на сколько миллиампер изменяется анодный ток при изменении потенциала сетки на 1 В, если анодное напряжение постоянное.

3. Коэффициент усиления $\mu = \partial U_a / \partial U_c$ представляет собой отношение анодного напряжения к сеточному. Очевидно, что $\mu = S \cdot R_l$.

Все три параметра имеют смысл только при работе лампы на линейных наклонных участках характеристик. На сеточных характеристиках эти участки лежат в области отрицательных значений сеточного напряжения, поэтому характеристики называются «левыми».

Рассмотренные основные параметры лампы относятся к статическому режиму, т. е. к такому, когда нагрузочное сопротивление в цепи анода отсутствует. Их называют поэтому *статическими параметрами*. В радиоаппаратуре в анодные цепи обычно включены нагрузочные сопротивления R_a (рис. 2). В этом случае режим лампы и ее параметры называются *динамическими*. В динамическом режиме анодное напряжение меньше, чем напряжение анодной батареи, так как часть напряжения падает на нагрузочном сопротивлении.

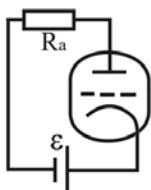


Рис. 2

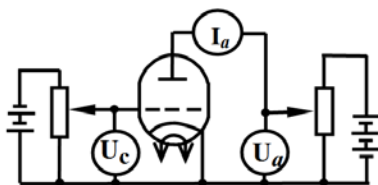


Рис. 3

В данной работе для исследования трехэлектродных ламп применяется установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 3.

Порядок выполнения работы

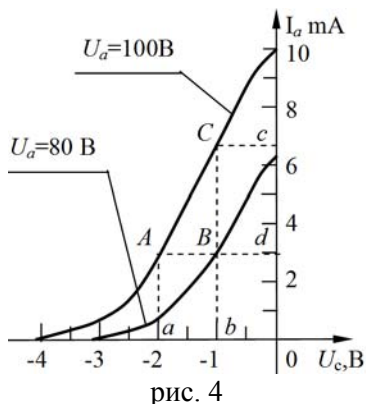
Опыт 1: Снятие сеточных характеристик

1. Подготовить таблицу:
2. Снять сеточные характеристики для трех постоянных значений анодного напряжения, изменяя U_c через каждые 0,5 В.
3. Построить три сеточных характеристики, откладывая по оси x значения U_c в вольтах, а по оси y значения I_a в миллиамперах.

$U_{a3} = 100 \text{ В}$		$U_{a2} = 80 \text{ В}$		$U_{a1} = 60 \text{ В}$	
$U_c \text{ (В)}$	$I_a \text{ (мА)}$	$U_c \text{ (В)}$	$I_a \text{ (мА)}$	$U_c \text{ (В)}$	$I_a \text{ (мА)}$
-4		-4		-4	
-3,5		-3,5		-3,5	
-3		-3		-3	
⋮		⋮		⋮	
-0,5		-0,5		-0,5	
0		0		0	

Опыт 2: Определение параметров трехэлектродной лампы

По двум сеточным характеристикам можно определить параметры лампы. Пусть одна из характеристик снята при анодном напряжении $U_a = 100$ В, а другая – при $U_a = 80$ В. В области линейных участков этих характеристик строим треугольник ABC (рис. 4), где катет AB проводим параллельно оси абсцисс, а катет BC – параллельно оси ординат. Обозначим абсциссы точек A, B, C соответственно a, b, c , а ординаты этих точек d, c .



1. Определение крутизны характеристики

Рассмотрим «левую» характеристику, снятую при $U = 100$ В. Если напряжение на сетке U_c возрастает от a до b , то I_a увеличивается от c до d , значит $U_a = \text{const}$.

$$\Delta U_c = b - a, \quad \Delta I_a = c - d, \quad S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \right)_{U_a = \text{const}} = \frac{c - d}{b - a} \text{ мА/В.}$$

2. Определение внутреннего сопротивления

Точки B и C принадлежат к различным характеристикам, но сняты при одном и том же потенциале на сетке. Ординаты точек B и C показывают силы тока соответственно при $U_a = 100$ В и $U_a = 80$ В. Так как для этих точек $\Delta U_c = 0$, то увеличение силы тока от d до c обусловлено только изменением анодного потенциала:

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_c = \text{const}} = \frac{100 - 80}{c - d}.$$

3. Определение коэффициента усиления

Изменить силу тока от d до c можно двумя путями:

- 1) увеличивая U_c от a до b при $U_a = 100$ В,
- 2) увеличивая U_a от 80 В до 100 В при $U_c = \text{const}$.

Отношение ΔU_a к ΔU_c , дающих одинаковое изменение силы тока

$$\Delta I_a = c - d, \text{ есть коэффициент усиления } \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{100 - 80}{b - a}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии?
2. Расскажите устройство электровакуумного диода.

3. Расскажите устройство электровакуумного триода. Каково назначение различных электродов?
4. Какими параметрами характеризуется работа триода? Объясните их физический смысл
5. Каким образом связаны параметры триода?
6. Как определяются параметры электровакуумного триода по сеточным характеристикам?
7. Объясните порядок выполнения работы?

Лабораторная работа № 21

Экспериментальное определение

горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Цель работы: Изучить законы электромагнетизма. Измерить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

Тангенс-гальванометр

Рассмотрим соленоид, состоящий из N витков. Ось соленоида расположим горизонтально и направим перпендикулярно плоскости магнитного меридиана.

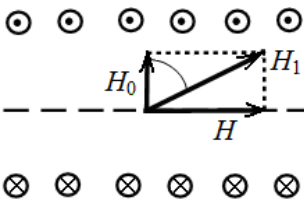


Рис. 1.

В центральной части соленоида поместим магнитную стрелку, вращающуюся вокруг вертикальной оси. Если по соленоиду пропустить ток I , то возникает магнитное поле с напряженностью $H = nI$, направленное по оси соленоида. Таким образом, на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля; магнитное поле

Земли и магнитное поле соленоида. Напряженности обоих полей взаимно перпендикулярны. На рис. 1 изображено сечение соленоида горизонтальной плоскостью. Здесь H – вектор напряженности поля, созданного током, H_0 – горизонтальная составляющая магнитного поля Земли.

Стрелка установится по направлению равнодействующей H_1 , т. е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут вектор напряженности магнитного поля Земли H_0 и соленоида H . Из рис. 1 видно, что

$$H_0 = H / \operatorname{tg} \alpha .$$

Напряженность магнитного поля на оси соленоида равна $H = nI$. Поэтому

$$H_0 = \frac{n \cdot I}{\operatorname{tg} \alpha} . \quad (1)$$

Таким образом, соленоид с магнитной стрелкой, расположенный по его оси может быть использован для измерения горизонтальной составляющей магнитного поля. Прибор, созданный на этом принципе, носит название тангенс-гальванометра.

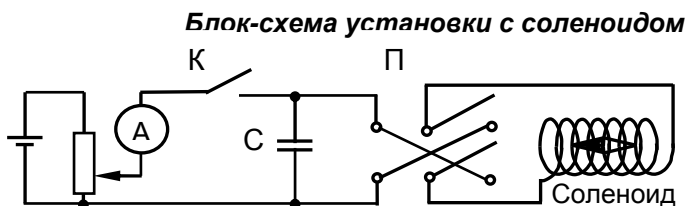


Рис. 2

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу измерений.

№	I	$\alpha_{лев}$	$\alpha_{прав}$	$\bar{\alpha}$	H_0	\bar{H}_0	ΔH_0	$\Delta \bar{H}_0$	$\bar{H}_0 \pm \Delta \bar{H}_0$
1									
2									
3									
4									
5									

2. Установить соленоид так, чтобы его ось была перпендикулярна направлению «север-юг», т. е. перпендикулярна направлению магнитной стрелки.
3. Установить регулятор тока соленоида в крайнее левое положение.
4. Включить установку в сеть.
5. Плавно поворачивая ручку регулятора тока, установить ток при котором стрелка компаса отклонится на 10° . Предел шкалы амперметра 200 мА. Показания прибора и отклонение магнитной стрелки занести в таблицу.
6. Нажать кнопку в верхней части прибора и в момент, когда ток уменьшится до нуля, перевести тумблер в другое положение и отпустить кнопку. Стрелка компаса плавно повернется в другое направление. Угол, на который отклонится стрелка компаса, занести в таблицу.
7. Увеличивая ток, добиться отклонения стрелки компаса на углы: 20° , 30° , 40° , 50° и выполнять указания пунктов 5 и 6.
8. Вычислить все необходимые значения и заполнить таблицу. В нашей лабораторной установке число витков на единицу длины $n=200$.

Установка с круговым контуром

В центральной части контура поместим магнитную стрелку, вращающуюся вокруг вертикальной оси. Если по контуру пропустить ток I , то в центре возникает магнитное поле с напряженностью $H_K = NI/2R$ (*), направленное по оси перпендикулярной плоскости витков. Т. о., на стрелку будут

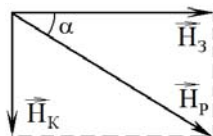


рис. 3

действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле контура. Напряженности обоих полей взаимно перпендикулярны, аналогично показанному на рис. 1. Стрелка установится по направлению равнодействующей H_P , т. е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут вектор напряженности магнитного поля Земли H_3 и контура H_K . Из рис. 3 видно, что $H_3 = H_K / \operatorname{tg} \alpha$, легко заметить, что данная формула аналогична формуле (1). Подставляя выражение (*) для напряженности магнитного поля в центре N круговых витков с током получим расчетную формулу:

$$H_3 = \frac{N \cdot I}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2)$$

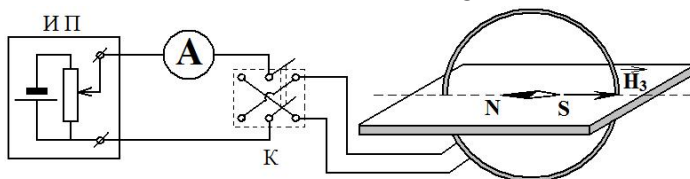


рис. 4

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу измерений.

№	α	$I_{\text{прав}}$	$I_{\text{лев}}$	$I_{\text{ср}}$	H_3	ε	ΔH_3	$\bar{H}_3 \pm \Delta \bar{H}_3$
1	10°							
2	20°							
3	30°							
4	40°							
5	50°							
Средние значения								

- Установить плоскость катушки тангенс-гальванометра так, чтобы она совпала с плоскостью магнитного меридиана (рис. 4).
- Установить регулятор тока в крайнее левое положение, тумблер К перевести в нижнее положение и включить установку в сеть.
- Плавно поворачивая ручку регулятора тока, установить угол 10° по шкале компаса указанный преподавателем. При этом стрелка компаса

отклонится вправо от нулевой отметки. Показания амперметра занести в соответствующую колонку таблицы. Предел шкалы амперметра 1 А.

5. Увеличивая ток, добиться отклонения стрелки компаса на углы: 20°, 30°, 40°, 50° и соответствующие этим углам показания амперметра занести в таблицу.
6. Изменить направление тока в катушке, переключив тумблер в верхнее положение. При этом стрелка компаса должна отклониться влево от нулевой отметки на угол 50°. Если значение угла другое, то ручкой регулятора тока добиться необходимого положения стрелки компаса. Показания амперметра занести в соответствующую колонку таблицы.
7. Уменьшая ток, добиться отклонения стрелки компаса на углы: 40°, 30°, 20°, 10° и соответствующие этим углам показания амперметра занести в таблицу.
8. Вычислить значения H_3 по формуле (2). Произвести оценку погрешности и заполнить таблицу. В лабораторной установке число витков в катушке $N=10$. Радиус катушки $R=0,2$ м.

Оценка систематической погрешности

Оценим значение систематической погрешности. Для этого прологарифмируем выражение (2):

$$\ln H_3 = \ln N + \ln I - \ln 2 - \ln R - \ln(\operatorname{tg} \alpha)$$

Дифференцируем:

$$\frac{dH}{H} = \frac{dI}{I} - \frac{dR}{R} - \frac{d\alpha}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos^2 \alpha} = \frac{dI}{I} - \frac{dR}{R} - \frac{\cos \alpha \cdot d\alpha}{\sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha} = \frac{dI}{I} - \frac{dR}{R} - \frac{2d\alpha}{\sin 2\alpha}.$$

Заменим дифференциалы систематическими погрешностями приборов, а «минусы» на «плюсы»:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}.$$

Систематическая погрешность амперметра определяется его классом точности, для данного прибора равна $\Delta I = 5 \cdot 10^{-3}$ А, в измерении радиуса катушки $\Delta R = 5 \cdot 10^{-3}$ м, а в измерении углов $\Delta\alpha = 0,044$ рад.

Контрольные вопросы

1. Назовите единицы измерения магнитной индукции, магнитного потока, напряженности магнитного поля, индуктивности.
2. Сформулируйте закон Ампера.
3. Запишите закон Био-Савара-Лапласа.
4. Выведите формулы для определения индукции магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током, на оси кругового тока, в центре витка с током.

5. Сформулируйте закон полного тока и выведите формулу для определения магнитной индукции на оси бесконечно длинного соленоида.
6. Расскажите о земном магнетизме. Как располагаются силовые линии магнитного поля Земли?
7. Расскажите устройство тангенс-гальванометра.
8. Выведите формулу для определения напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.
9. Как располагается ось соленоида относительно плоскости магнитного меридиана?
10. Расскажите порядок выполнения работы.

Лабораторная работа № 22

Снятие петли гистерезиса ферромагнетика

Цель работы: исследование зависимости магнитной индукции в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля.

Краткая теория

Вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, т. е. они намагничены даже при отсутствии внешнего магнитного поля – называются **ферромагнетиками**. Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в пределах $10^2 \div 10^5$. К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Ферромагнетиками могут быть различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая **температура или точка Кюри**), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком.

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на **магнитомягкие** и **магнитожесткие** материалы. Магнитомягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. К магнитомягким материалам относится, например, чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание (трансформаторы, электродвигатели и т. п.).

Магнитожесткие материалы сохраняют в значительной мере свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами магнитожестких материалов могут служить углеродистая сталь и ряд

специальных сплавов. Магнитожесткие материалы используются в основном для изготовления **постоянных магнитов**.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетиков **не является постоянной величиной**; она сильно зависит от напряженности внешнего поля. Типичная зависимость $\mu(H)$ приведена на рис. 1. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

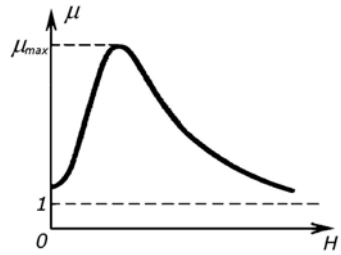


Рис. 1.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля. Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является так называемый **гистерезис**. Кривая намагничивания $B(H)$ ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется **петлей гистерезиса** (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что при $|H| > B_s$ наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения.

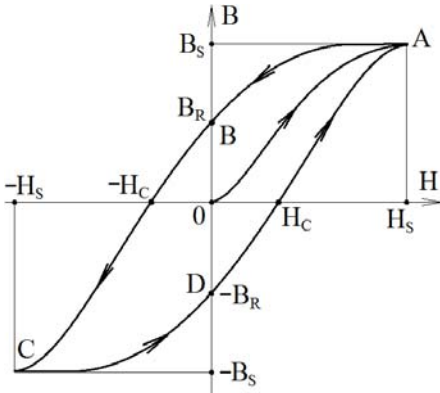


Рис. 2. Петля гистерезиса ферромагнетика. Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении напряженности внешнего магнитного поля H .

Если теперь уменьшать напряженность внешнего магнитного поля H и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит **остаточную намагниченность** — поле внутри образца будет равно B_r . Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести напряженность внешнего магнитного поля H до значения $-H_c$, которое принято называть **коэрцитивной силой**. Далее процесс перемагничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рис. 2.

У магнитомягких материалов значения коэрцитивной силы невелико – петля гистерезиса таких материалов достаточно «узкая». Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие «широкую» петлю гистерезиса, относятся к магнитожестким.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка $10^{-2} \div 10^{-4}$ см. Эти области называются *доменами*. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит. В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой кристалл в среднем окажется ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля B_0 происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение.

Блок-схема установки с магнитной стрелкой

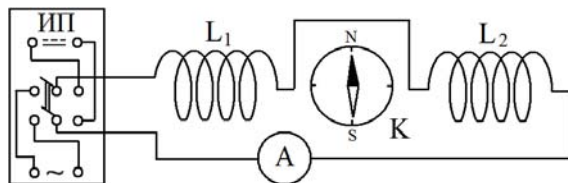


Рис. 3.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу измерений.
2. Собрать схему согласно рис. 3.
3. Установить прибор таким образом, чтобы плоскости витков катушек были параллельны плоскости магнитного меридиана и добиваются компенсации магнитных полей, создаваемых этими катушками, на магнитную стрелку компаса.

Участок 0А			Участок АВ			Участок ВС			Участок CD			Участок DA		
I (A)	φ	$\text{tg}\varphi$	I (A)	φ	$\text{tg}\varphi$	I (A)	φ	$\text{tg}\varphi$	I (A)	φ	$\text{tg}\varphi$	I (A)	φ	$\text{tg}\varphi$
0,1			0,6			-0,1			-0,6			0,1		
0,2			0,5			-0,2			-0,5			0,2		
0,3			0,4			-0,3			-0,4			0,3		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0,7			0			-0,7			0			0,7		

4. В одну из катушек поместить ферромагнитный образец, пропуская по катушке переменный ток, постепенно уменьшая его до нуля. При этом происходит размагничивание ферромагнитного образца.
5. Поместить размагниченный образец в одну из катушек, при этом стрелка компаса не изменяет своего положения. Если стрелка отклоняется от первоначального положения, повторить размагничивание образца (пункт 4).
6. Регулировкой напряжения постепенно увеличить величину тока в катушках от нуля до максимального значения ($\approx 0,87$ А). Отсчитать углы отклонения стрелки компаса от первоначального положения, через каждые $0,05 \div 0,1$ А (кривая 0А на рис. 2).
7. Доведя ток до максимального значения, такими же интервалами уменьшить его до нуля, при этом фиксировать углы отклонения стрелки компаса (кривая АВ на рис. 2).
8. Изменить полярность источника постоянного тока и повторить измерения согласно пунктам 6 и 7. Углы φ при отклонении стрелки в противоположную сторону от нуля считать отрицательными: (кривые ВС и CD на рис. 2).
9. Вновь изменить полярность источника питания, и провести измерения до достижения максимального тока (кривая DA на рис. 2).
10. Полученные результаты занести в таблицу.
11. Откладывая по оси абсцисс величину тока, а по оси ординат $\text{tg } \varphi$, построить кривую зависимости $\text{tg } \varphi = f(I)$.

Примечание: в продолжении всего опыта необходимо следить за плавным изменением величины тока (регулятор изменения напряжения поворачивать очень медленно). При малейшей неосторожности, т. е. при случайном размыкании цепи или случайном резком изменении величины тока, опыт прекратить, стержень размагнитить и работу начать сначала!

Лабораторная установка с датчиком Холла

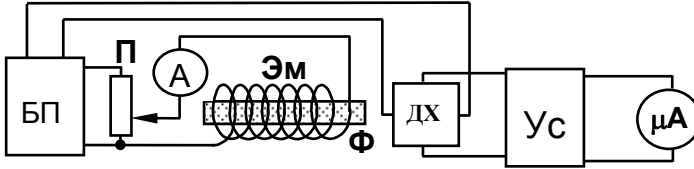


Рис. 4

Установка для получения петли гистерезиса представлена на рис. 4.

Исследуемым веществом в нашей работе является ферромагнитный образец (Ф) (сверло из быстрорежущей стали \varnothing 6 мм), который помещается в катушку электромагнита (Эм).

Все напряжения необходимые для работы установки формируются в блоке питания (БП). Постоянный ток, подаваемый в катушку электромагнита, регулируется потенциометром (П) и измеряется амперметром (А). При размагничивании образца на катушку электромагнита подается переменное напряжение частотой 50 Гц.

Намагниченность образца измеряется с помощью датчика Холла (ДХ) (см. лаб. работу № 40), который установлен на одном из концов образца. Сигнал с датчика Холла составляет милливольты, поэтому он предварительно усиливается (Ус), а затем подается на стрелочный прибор (μ А).

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу.

Участок OA		Участок AB		Участок BC		Участок CD		Участок DA	
I_H	I_B	I_H	I_B	I_H	I_B	I_H	I_B	I_H	I_B
0		+500		0		-500		0	
+100		+400		-100		-400		+100	
+200		+300		-200		-300		+200	
+300		+200		-300		-200		+300	
+400		+100		-400		-100		+400	
+500		0		-500		0		+500	

2. Включить установку в сеть и дать прогреться 5 мин.
3. Крайне правый тумблер перевести в положение «Размагнич. образца» и плавно повернуть ручку «Регулировка тока магнита» в крайнее правое положение (по часовой стрелке), а затем плавно вернуть ее в крайнее левое положение. В результате этой операции образец будет размагничен.
4. Перевести тумблер T_1 в положение «Измерение»
5. Тумблер T_2 перевести в положение «+Н».

6. Плавно вращая ручку «Регулировка тока электромагнита» установить стрелку микроамперметра, находящегося на верхней крышке прибора, на деление +100. Это будет соответствовать току в катушке электромагнита 100 мА. Предельное значение тока, измеряемое этим микроамперметром 0,5 А. Если вы установили значение тока большее, чем 100 мА, то возвращаться не следует т.к. при гистерезисе при обратном ходе вы получите другие значения намагниченности, чем при прямом. Исправьте значение тока в первой колонке на то, какое вы установили. Однако можно вернуть регулятор тока в крайнее левое положение, провести размагничивание и все начать сначала.
7. Занесите в таблицу показания микроамперметра, находящегося на лицевой стороне установки. Показания этого прибора пропорциональны индукции магнитного поля в образце.
8. Плавно увеличивая ток в катушке до 500 мА и, занося показания пропорциональные индукции магнитного поля в образце, пройти участок 0А.
9. Уменьшая ток в катушке до нуля, пройти участок АВ.
10. Перевести тумблер T_2 в положение – Н и пройти участки ВС и CD.
11. Вновь перевести верхний тумблер T_2 в положение +Н и пройти участок DA.
12. По полученным данным построить график зависимости $I_B = f(I_H)$.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются ферромагнетиками?
2. Объясните петлю гистерезиса ферромагнетика.
3. Какие ферромагнетики являются магнитомягкими, магнитожесткими? Где их применяют?
4. Каков механизм намагничивания ферромагнетиков?
5. Чему равна площадь петли гистерезиса?
6. Какую температуру для ферромагнетика называют точкой Кюри?
7. Сформулируйте закон Кюри-Вейсса.
8. Что такое токи Фуко?
9. Расскажите об эффекте Баркгаузена.
10. Что произойдет с ферромагнетиком в переменном магнитном поле спустя некоторое время?
11. Почему не бывает магнитов с одним полюсом?

Лабораторная работа № 23

Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона

Цель работы: экспериментально определить величину удельного заряда электрона.

Краткая теория

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся одновременно в электрическом и магнитном полях равна сумме сил со стороны электрического и магнитного полей:

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{E} + e \cdot [\vec{v} \times \vec{B}].$$

Данное выражение было получено Г. А. Лоренцем (1853-1928). Сила \vec{F}_L носит его имя – *сила Лоренца*. Магнитная составляющая данной силы является единственной известной в природе силой не совершающей работы. Для доказательства запишем определение элементарной механической работы:

$$dA = (\vec{F}_L \cdot d\vec{r}) = e([\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{r}).$$

Полученное смешанное произведение векторов обладает свойством циклической коммутации, применим его:

$$([\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{r}) = ([d\vec{r} \times \vec{v}] \cdot \vec{B}).$$

Распишем вектор скорости согласно определению и вынесем оператор производной за знак произведения:

$$dA = e \left(\left[d\vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right] \cdot \vec{B} \right) = e \frac{d}{dt} \left(\underbrace{[d\vec{r} \times d\vec{r}] \cdot \vec{B}}_0 \right) = 0,$$

а векторное произведение перемещения самого на себя равно нулю, что и требовалось доказать.

Под действием силы Лоренца частица массой m получает ускорение:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_L}{m} = \frac{e}{m} \cdot (\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]).$$

Из этого уравнения можно сделать вывод: *характер движения заряженной частицы определяется отношением заряда частицы к её массе*. Величина e/m носит название *удельного заряда* и является важной характеристикой заряженных частиц, позволяющей производить расчет поведения частиц в электрических и магнитных полях.

Рассмотрим траекторию электронов, вылетевших из катода при потенциале анода U_a . В отсутствие магнитного поля ($B=0$) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса (рис. 1). При слабом поле ($B < B_{кр}$) траектория несколько искривляется. При критическом значении индукции магнитного поля ($B = B_{кр}$) траектория искривится настолько, что электроны коснутся анода. При условии $B > B_{кр}$ электроны не попадут на анод и возвратятся на катод.

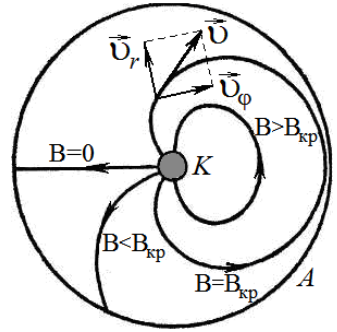


Рис. 1

Радиальная составляющая скорости электрона v_r у анода, т. е. при условии $r = a$ обращается в нуль, где a – радиус анода.

Работа сил электрического поля, совершаемая при перемещении электрона от катода до анода U_a , равна $A = eU_a$ и пойдет на увеличение его кинетической энергии $eU_a = mv^2/2$.

Электрон движется по криволинейной траектории и вектор скорости при этом имеет две проекции. Радиальную составляющую – v_r , и перпендикулярную радиусу v_ϕ . Квадрат модуля скорости равен $v^2 = v_r^2 + v_\phi^2$, подставляя его в (1), получим: $eU_a = m(v_r^2 + v_\phi^2)/2$.

Как мы уже выяснили, что при $B = B_{кр}$ проекция скорости v_r электрона у анода обращается в нуль, поэтому

$$eU_a = mv_\phi^2/2. \quad (2)$$

Найдем проекцию скорости v_ϕ . Эта скорость связана с угловой известным соотношением $v_\phi = \omega \cdot r$. Для ее нахождения воспользуемся вторым законом Ньютона для вращательного движения $\vec{M} = d\vec{L}/dt$.

Т. к. момент импульса электрона $L = I\omega$, а момент инерции электрона $I = mr^2$, то

$$M = \frac{d}{dt}(mr^2\omega). \quad (3)$$

Величина момента силы, действующей на электрон, равна произведению силы Лоренца на радиус, т. е.

$$M = eBv_r r, \quad \text{где } v_r = dr/dt.$$

Поэтому
$$M = eBr \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} eB \frac{d}{dt}(r^2).$$

Подставим (3) в (4), получим

$$\frac{d}{dt}(mr^2\omega) = \frac{1}{2}eB \frac{d}{dt}(r^2).$$

Или

$$d(r^2\omega) = \frac{eB}{2m} \cdot d(r^2).$$

Интегрируем (5)

$$\frac{eB}{2m} \cdot \int d(r^2) = \int d(r^2\omega) \Rightarrow \frac{eB}{2m} \cdot r^2 = r^2\omega + C,$$

где C – постоянная интегрирования, значение которой оценим из начальных условий. В начале движения радиус траектории r равен радиусу катода, т. е. очень мал. Левая часть и первый член его правой части тоже очень малы (электроны вылетают из катода с небольшой скоростью, так что ω в начальный момент также мала). С хорошей точностью можно положить $C = 0$. Поэтому $\omega = eB/2m$. Так как $v_\varphi = \omega r$, то $v_\varphi = eBr/2m$. У анода, т. е. при условии $r = a$, $v_\varphi = eBa/2m$. Подставим v_φ в (2), получим

$$eU_a = \frac{1}{2}m \left(\frac{eBa}{2m} \right)^2.$$

Откуда

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{\text{кр}}^2 a^2}.$$

где U_a – напряжение между катодом и анодом, $B_{\text{кр}}$ – критическое значение индукции магнитного поля, радиус анода $a = 5 \text{ мм}$.

В работе удельный заряд электрона определяется методом магнетрона. Это название объясняется тем, что расположение электрического и магнитного полей в лабораторной работе похоже на расположение полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот (генераторах СВЧ). Магнетроны, мощностью около 1 кВт используются, в частности, в микроволновых СВЧ-печах.

Методика измерений

На рис. 2 изображена схема установки, где Л – электронная лампа 3Ц11С; Э – электромагнит; mA – миллиамперметр; А – амперметр; Б_н, Б_а, Б_э – источники питания цепей накала, анода и электромагнита соответственно; R_а, R_с – регулировочные сопротивления в цепях анода и электромагнита.

В электронной лампе 3Ц11С катод расположен по оси цилиндрического анода. Лампу (Л) располагают в электромагните (Э) так, чтобы её ось совпадала с осью электромагнита. На электроны, вылетающие из катода, действуют силы электрического и магнитного полей (рис. 1).

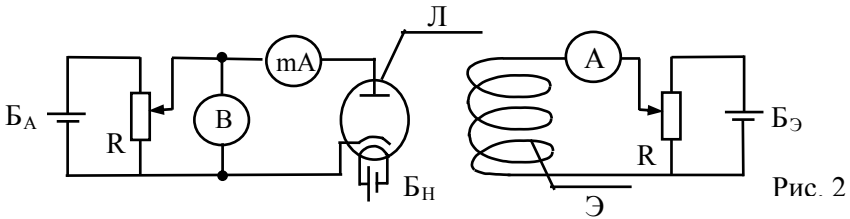


Рис. 2

Сбросовые характеристики (рис. 3) не дают вертикального спада анодного тока. Если бы все электроны имели одинаковые скорости, то анодный ток с увеличением магнитного поля изменялся бы так, как показано на рис. 3 штриховой линией. Критические условия достигаются для разных электронов при разных значениях B . Сбросовая характеристика приобретает вид, показанный сплошной линией. Кроме того, невозможно обеспечить полную коаксиальность (совпадения осей) анода и катода.

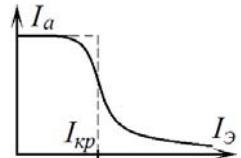


рис. 3

Для расчета значения e/m необходимо брать значение $I_{кр}$ из средней части участка сбросовой характеристики. Этот участок соответствует электронам, движущимся со скоростями близкими к наиболее вероятной.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку и дать лампе прогреться 3 минуты.
2. Переключателем установить анодное напряжение U_{a1} . В лабораторной установке измерения можно производить при анодных напряжениях 12,5 В, 25 В, 50 В, 62,5 В и 75В. Провести измерения при двух анодных напряжениях U_{a1} , U_{a2} по указанию преподавателя.
3. Плавно увеличивать значение тока в катушке электромагнита $I_Э$ до 3 А. На интервале, где наблюдается резкий спад анодного тока, частоту замеров увеличить (рис. 4) для лучшей прорисовки сбросовой характеристики.

№	$U_{a1} = \dots$ (В)		$U_{a2} = \dots$ (В)	
	$I_Э$ (А)	I_a (μА)	$I_Э$ (А)	I_a (μА)
1				
2				
3				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n				

4. Результаты измерений занести в таблицу.
5. По полученным данным построить две сбросовых характеристики $I_a = f(I_Э)$, примерный вид которых показан на рис. 4.

6. На каждом графике найти значения $I_{кр}$. Значения $I_{кр}$ соответствуют таким значениям тока электромагнита $I_{кр}$ при которых наблюдается наибольший спад анодного тока на сбросовой характеристике.
7. Индукция магнитного поля на оси катушки вычисляется по формуле:

$$B_{кр} = 0,0112 \cdot I_{кр} \text{ (Тл)}.$$
8. Рассчитать отношение e/m по формуле (6) для двух, указанных выше, режимов работы установки и найти среднее значение отношения заряда электрона к его массе.

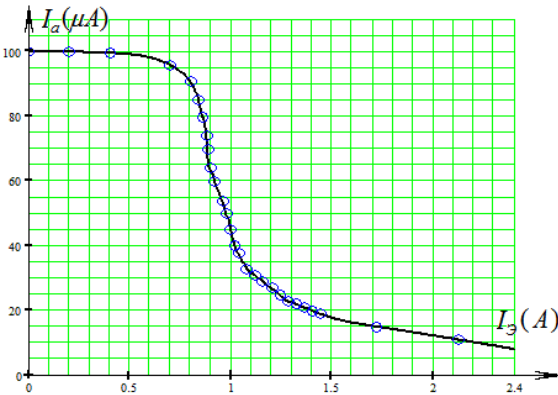


Рис. 4. Примерный вид графика зависимости анодного тока лампы от тока электромагнита (соленоида).

Контрольные вопросы

1. Чему равна и как направлена сила действующая на заряд, движущийся в магнитном поле?
2. Запишите выражение для силы Лоренца.
3. По какой траектории движется заряд в однородном магнитном поле?
4. Нарисуйте схему установки для измерения удельного заряда электрона?
5. От чего зависит траектория электронов движущихся в диоде, помещенном в магнитное поле?
6. Почему сбросовая характеристика имеет вид плавной кривой?
7. Напишите формулу для вычисления отношения заряда электрона к его массе?
8. Расскажите порядок выполнения работы.
9. Расскажите порядок обработки экспериментальных данных.
10. Почему сила Лоренца не совершает работы?
11. Где используется действие силы Лоренца?

Лабораторная работа № 24

Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронного пучка (метод Буша).

Цель работы: экспериментальное определение удельного заряда электрона.

Краткая теория

На электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{v} – скорость электрона.

Эта сила перпендикулярна скорости движения электрона и поэтому не изменяет её абсолютной величины.

Если угол между направлениями векторов скорости и магнитной индукции α , то скорость движения можно разложить на две составляющие, одна из которых перпендикулярна, другая параллельна вектору магнитной индукции:

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha, \quad v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha. \quad (2)$$

Спроектируем уравнение (1) на плоскость, перпендикулярную направлению вектора магнитной индукции:

$$F_L = e \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha = e \cdot B \cdot v_{\perp}. \quad (3)$$

На значение силы Лоренца влияет только нормальная составляющая скорости v_{\perp} . Если рассматривать движение электрона как сложное движение со скоростями v_{\perp} и v_{\parallel} , то можно утверждать, что сила Лоренца не влияет на движение вдоль силовых линий индукции магнитного поля, но влияет на изменение направления нормальной составляющей скорости v_{\perp} и вызывает движение по окружности радиуса R . Найдем период обращения электрона по этой окружности.

Сила F_L является центростремительной силой, поэтому:

$$e \cdot B \cdot v_{\perp} = m \cdot v_{\perp}^2 / R, \text{ откуда } v_{\perp} = e \cdot B \cdot R / m. \quad (4)$$

Время одного оборота электрона $T = 2\pi \cdot R / v_{\perp}$, поэтому

$$T = 2\pi \cdot m / e \cdot B. \quad (5)$$

Интересно отметить, что период обращения электрона в однородном магнитном поле не зависит ни от радиуса, ни от скорости v_{\perp} . Все электроны, влетевшие в данное магнитное поле, сделают один полный оборот за одно и то же время.

За время одного оборота электрон сместится вдоль силовых линий индукции магнитного поля на расстояние равное шагу винта: $h = v_{\parallel} \cdot T$, или, с учетом (2)

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}. \quad (6)$$

Если угол α мал, т. е. электроны летят под малым углом к направлению силовых линий индукции магнитного поля, то в этом случае можно записать

$$h = \frac{2\pi m v}{eB}. \quad (7)$$

Таким образом, для малых углов путь, пройденный электроном в магнитном поле за один оборот, не зависит от угла α . Из этого следует, что *все электроны, вышедшие из одной точки под небольшими, но разными углами к направлению силовых линий индукции магнитного поля, после одного оборота соберутся в одной точке*. В этом и заключается принцип магнитной фокусировки электронов.

Выражение (8) может служить для определения удельного заряда электрона

$$e/m = 2\pi \cdot v / (h \cdot B). \quad (8)$$

В эксперименте электроны до влета в магнитное поле разгоняются в электрическом поле, имеющем разность потенциалов U , в котором приобретают кинетическую энергию,

$$m v^2 / 2 = e \cdot U. \quad (9)$$

Подставив (1) в (8), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{(h \cdot B)^2}. \quad (10)$$

При некотором минимальном поле B произойдет первая фокусировка. При этом электрон совершит один оборот спирали, шаг которой в этом случае будет $h = L$, где L – расстояние между вторым анодом ЭЛТ и флуоресцирующим экраном. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля произойдет вторая фокусировка. Электрон совершит два оборота и шаг спирали будет равен $h = L/2$, если n оборотов, то $h = L/n$. Формулу (10) с учетом последних замечаний перепишем следующим образом:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{(L \cdot B/n)^2}, \quad (11)$$

где n – число витков винтовой траектории электрона.

Экспериментальная установка

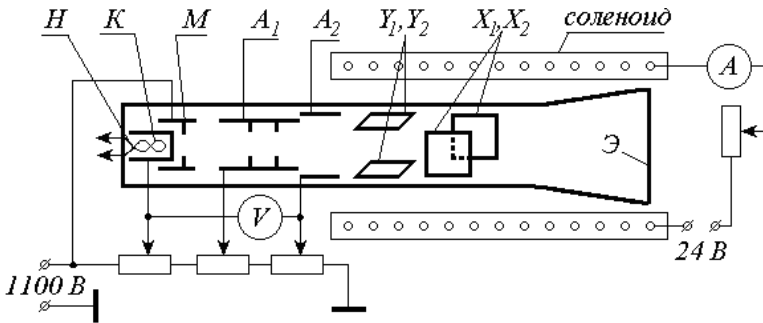


Рис. 1.

Схема установки представлена на рис. 1, где Н – подогреватель катода (нить накала), К – катод (источник электронов), М – модулятор (управляющий электрод), A_1 – фокусирующий электрод (первый анод), A_2 – ускоряющий анод (второй анод), Y_1, Y_2 – вертикально отклоняющие пластины, X_1, X_2 – горизонтально отклоняющие пластины, Э – флуоресцирующий экран, С – соленоид.

Для создания потока электронов и их фокусировки используется электроннолучевая трубка ЛО 247 осциллографа Н3013. Электроннолучевая трубка помещается в соленоид, который создает постоянное магнитное поле. Питание соленоида осуществляется от отдельного блока питания. Индукция B , создаваемая соленоидом, линейно зависит от тока $B = k \cdot I$. Для используемого в работе соленоида $k = 0,014$ Тл/А.

В нашей установке значение тока может регулироваться от нуля до одного ампера.

Питание самой трубки осуществляется от блока питания осциллографа. Электрон ускоряется в пространстве между катодом и вторым анодом электроннолучевой трубки. Это напряжение измеряется вольтметром с высоким входным сопротивлением (20 МОм). Ускоряющее напряжение может изменяться резистором, выведенным на верхнюю крышку корпуса осциллографа (красная ручка) в пределах от 700 до 1000 вольт.

Расстояние между вторым анодом и флуоресцирующим экраном для нашей ЭЛТ составляет 0,12 м. Поэтому, подставив численные значения параметров нашей установки в формулу (11), получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \cdot U \cdot n^2}{(0,12 \cdot 0,014 \cdot I)^2} = \frac{2,81 \cdot 10^7 \cdot U \cdot n^2}{I^2}. \quad (12)$$

Из формулы (12) видно, что для экспериментального определения отношения заряда электрона к его массе необходимо измерить ускоряю-

щее напряжение U и ток соленоида в моменты, когда на экране ЭЛТ мы будем наблюдать сфокусированное пятно.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу измерений.

№	Ускоряющее напряжение	n	Ток соленоида	$\frac{e}{m}$	$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} + \frac{2\Delta I}{I}$	$\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \pm \Delta \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle$
1	1000 В	1				
2		2				
3	900 В	1				
4		2				
5	800 В	1				
6		2				
Средние значения						

- Тумблер «Ускоряющее напряжение. Ток соленоида» перевести в верхнее положение. При этом прибор будет измерять ускоряющее напряжение. Предел шкалы прибора 1000 В.
- С помощью красной ручки на верхней крышке корпуса осциллографа установить ускоряющее напряжение 1000 В.
- Регулятором напряжения на блоке питания соленоида добиться того, чтобы на экране ЭЛТ было пятно минимального размера. Первая фокусировка наблюдается при токе соленоида около 0,4 А.
- Перевести тумблер в нижнее положение. В этом положении тумблера прибор будет показывать ток соленоида. Предел шкалы в этом случае 1 А. Фокусировка пятна может несколько нарушиться. Это происходит потому, что измерительный прибор отключается от цепи питания ЭЛТ и подключается к цепи питания соленоида. Измерительный прибор, хотя и имеет очень большое внутреннее сопротивление (20 МОм), однако при измерении уменьшает ускоряющее напряжение на небольшую величину. Не восстанавливая фокусировки записать показания амперметра в таблицу.
- Плавно увеличивая ток соленоида, добиться второй фокусировки.
- Значение тока занести в таблицу.
- Перевести тумблер в верхнее положение. Красной ручкой, расположенной на верхней части корпуса осциллографа, установить ускоряющее напряжение $U = 900$ В. Прodelать пункты 4, 5, 6, 7, 8.
- Произвести необходимые расчеты и заполнить все столбцы таблицы.

Контрольные вопросы

- Запишите выражение для силы Лоренца. Как направлена сила Лоренца?

2. Выведите выражение для периода обращения заряда в однородном магнитном поле.
3. От каких факторов зависит период обращения электрона в однородном магнитном поле?
4. По какой траектории движется электрон в однородном магнитном поле?
5. Как связан шаг винтовой линии, по которой движется электрон с периодом обращения в однородном магнитном поле?
6. Нарисуйте электроннолучевую трубку и расскажите, как с помощью продольного магнитного поля можно сфокусировать электронный пучок?
7. Выведите рабочую формулу для определения отношения заряда электрона к его массе.

Лабораторная работа № 25

Определение электродинамической постоянной

Цель работы: экспериментальным путем определить отношение единицы силы тока в системе СГСМ к единице тока в системе СГСЭ, которое численно равно скорости света в вакууме.

Краткая теория

Под системой физических величин понимают совокупность взаимосвязанных физических величин, используемых в отдельных областях естествознания.

Всякая система состоит из некоторого числа основных единиц, выбираемых независимо друг от друга, и совокупности производных единиц. Производные единицы образуются из основных с помощью соотношений, называемых *определяющими* для данной единицы. Одной из таких систем единиц является система СИ. Однако есть и другие системы единиц.

Система СГС

В физике до настоящего времени применяют систему единиц, построенную на трех основных единицах: *длины* (сантиметр), *массы* (грамм) и *времени* (секунда). Система поэтому носит название СГС. Единицей силы в этой системе является *дина*, определяющим уравнением, для которой служит второй закон Ньютона. $F = ma$.

Дина – сила, сообщающая телу массой в 1 г ускорение 1 см/с^2 .

Единица работы в системе СГС – эрг. Уравнением, определяющим эрг, является $A = FS$.

Эрг – работа, совершаемая силой в одну дина при перемещении на расстояние 1 см.

Абсолютная электростатическая система единиц (СГСЭ)

Определяющим уравнением для заряда в системе СГСЭ служить закон Кулона $F = k \cdot q_1 q_2 / r^2$. Коэффициент k в системе СГСЭ полагается равным единице. Заряд в системе СГСЭ является производной единицей.

Единицей заряда в СГСЭ – является такой точечный заряд, который взаимодействует в вакууме с равным ему зарядом на расстоянии в 1 см силой в 1 дину. Специального названия эта единица не имеет. Записывается СГСЭ_q.

За единицу силы тока в системе СГСЭ принимают такой ток, при котором через поперечное сечение проводника, протекает за одну секунду заряд 1 СГСЭ_q. Определяющим для тока является уравнение $I = q/t$. $1 \text{ СГСЭ}_I = 1 \text{ СГСЭ}_q / 1 \text{ с}$.

Единица потенциала в системе СГСЭ определяется уравнением $\varphi = A/q$.

За единицу потенциала в системе СГСЭ принимают потенциал такой точки, при перемещении в которую из бесконечности заряда в 1 СГСЭ_q силы поля совершают работу равную одному эргу. $1 \text{ СГСЭ}_\varphi = 1 \text{ эрг} / 1 \text{ СГСЭ}_q$.

Единица емкости определяется из уравнения $C = q/\varphi$.

За единицу емкости принимают емкость такого уединенного проводника, при сообщении которому заряда в 1 СГСЭ_q, потенциал его при этом повышается на 1 СГСЭ_φ. Анализ соотношений показывает, что емкость в СГСЭ измеряется в сантиметрах.

Абсолютная электромагнитная система единиц (СГСМ)

В системе СГСМ в качестве основных используют единицы системы СГС. Законом, определяющим единицу силы тока, является закон Ампера $F = k \cdot i_1 i_2 l / b$. Коэффициент k в законе Ампера в системе СГСМ равен единице.

Единица силы тока в системе СГСМ определяется как сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 см один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную одной дине на каждый сантиметр длины.

Единица силы тока в этой системе не имеет специального названия и обозначается просто СГСМ_I. Если некоторый ток измерить вначале в единицах СГСЭ, а затем в СГСМ, то мы получим разные численные значения.

Если I_3 – сила тока, измеренная в СГСЭ, а I_M – сила того же тока измеренного в СГСМ – единицах, то можно записать: $I_3 / I_M = c$, где c – некоторая постоянная, называемая электродинамической постоянной, ко-

торая имеет размерность скорости. Значение постоянной c можно определить только из опытов.

Такие опыты были проведены А. Г. Столетовым, В. Э. Вебером и другими учеными. Опыты привели к заключению, что электродинамическая постоянная равна скорости света в вакууме. Такое совпадение не случайно. Во второй половине XIX века Максвелл развил электромагнитную теорию, согласно которой свет есть электромагнитные волны, и теоретически показал, что скорость света в вакууме равна электродинамической постоянной.

Дальнейшие исследования показали, что между электричеством и магнетизмом имеется глубокая связь. Магнетизм есть релятивистский эффект.

Описание экспериментальной установки

Блок схема экспериментальной установки приведена на рис 1.

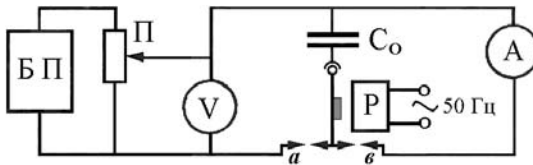


Рис. 1.

Конденсатор C_0 с частотой сети (50 Гц) попеременно с помощью реле (Р) подключается то к цепи зарядки, состоящей из блока питания (БП), потенциометра (П) и вольтметра (V) проградуированного в единицах потенциала СГСЭ $_{\phi}$, то к цепи разрядки через амперметр, проградуированный непосредственно в единицах тока в системе СГСМ $_1$. Время зарядки конденсатора много меньше периода переключений, т. е. когда реле подключает конденсатор к контакту a , то конденсатор успевает зарядиться до потенциала, показываемого вольтметром. Конденсатор получит заряд, определяемый выражением $q = C\phi_0$. За одну секунду конденсатор заряжается и разряжается 50 раз. В среднем, сила пульсирующего тока через контакт a , выраженная в электростатических единицах, равна $I_3 = q\nu = C\phi_0 \cdot \nu$.

При подключении конденсатора к цепи разряда, т. е. реле подключено к контакту b , конденсатор успевает разрядиться за время много меньшее, чем половина периода колебаний переменного тока сети. Т. е. в очередной момент возвращения контакта реле к клемме a , конденсатор полностью разряжен.

Амперметр (А) покажет средний ток разряда I_M .

Электродинамическая постоянная определится из выражения

$$c = \frac{I_{\text{Э}}}{I_M} = \frac{C\varphi_{\text{Э}}\nu}{I_M}. \quad (1)$$

Для удобства обработки экспериментальных результатов преобразуем эту формулу. Шкала измерительного прибора имеет 200 делений. Этот прибор используется для измерения и напряжения и тока.

Отклонение стрелки на полную шкалу при измерении напряжения соответствует $40 \cdot 10^{-3}$ СГСЭ $_{\varphi}$, поэтому цена деления

$$\varphi_0 = 40 \cdot 10^{-3} / 200 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ СГСЭ}_{\varphi}. \quad (2)$$

Пусть N_{φ} – показания прибора при измерении напряжения, тогда измеренное в единицах СГСЭ $_{\varphi}$ значение напряжения будет

$$\varphi_{\text{Э}} = N_{\varphi} \varphi_0. \quad (3)$$

Отклонение стрелки на полную шкалу при измерении тока разрядки конденсатора соответствует $10 \cdot 10^{-3}$ СГСМ $_I$, поэтому цена деления

$$I_0 = 10 \cdot 10^{-3} / 200 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ СГСМ}_I. \quad (4)$$

Пусть N_I – показания прибора при измерении тока, тогда измеренное в единицах СГСМ $_I$ значение тока будет

$$I_M = N_I \cdot I_0. \quad (5)$$

Значение ёмкости конденсатора $C_0 = 166,7 \cdot 10^{-6}$ Ф. Фарад (Ф) – единица электроёмкости в системе СИ. Один фарад соответствует $1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11}$ см. Напомним, что в СГСЭ ёмкость измеряется в сантиметрах. Переведем значение ёмкости C_0 из фарад в сантиметры

$$C_0 = 166,7 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^{11} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ см}. \quad (6)$$

Подставим выражения (2)-(6) в выражение (1)

$$c = \frac{I_{\text{Э}}}{I_M} = \frac{C_0 \varphi_{\text{Э}} \nu}{I_M} = \frac{1,5 \cdot 10^8 N_{\varphi} \varphi_0 \cdot 50}{N_I I_0} = 2,4 \cdot 10^{10} \cdot \frac{N_{\varphi}}{N_I} \text{ см/с}.$$

Таким образом, расчетной формулой в нашей работе является

$$c = 2,4 \cdot 10^{10} \cdot \frac{N_{\varphi}}{N_I} \text{ см/с}. \quad (7)$$

Точное значение скорости света в вакууме равно $c = 299\,792\,458$ м/с.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу.

	N_{φ}	N_I	c (см/с)	$\Delta c_i = c_i - c_{\text{сп}} $	$c \pm \Delta c$
1	100				
2	125				
3	150				
4	175				
5	200				
Средние значения					

2. Включить установку в сеть.
3. Перевести тумблер в положение «напряжение». Установить значение 100 по шкале прибора.
4. Перевести тумблер в положение «ток» и занести показания прибора в таблицу в колонку N_1 .
5. Установить следующее значение напряжения и выполнить указания пункта 4, результаты занести в таблицу.
6. Провести необходимые расчеты и заполнить таблицу.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные единицы системы СИ.
2. Назовите основные единицы системы СГС.
3. Назовите основные и производные единицы системы СГСЭ. Какой закон является определяющим для единицы заряда в системе СГСЭ?
4. Как определяется единица тока в системе СГСЭ.
5. Запишите закон, определяющий единицу силы тока в системе СГСМ?
6. Совпадает ли значение тока измеренного в единицах СГСЭ и СГСМ?
7. Как определяется электродинамическая постоянная?
8. Нарисуйте схему для экспериментального определения электродинамической постоянной.
9. Выведите формулу (7).
10. Расскажите о порядке выполнения работы и методе оценки погрешности.

Лабораторная работа № 26

Определение главного фокусного расстояния линз

Цель работы: Определить экспериментально фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линзы.

Фокусные расстояния определяются способами, в которых, так или иначе, используется формула тонкой линзы. Измерения выполняются на оптической скамье, вдоль которой могут перемещаться рейтеры с линзами и экран. Перед началом измерений центры всех линз необходимо установить на одинаковой высоте и проследить за тем, чтобы они располагались на одной линии.

Плоскости экрана и диафрагмы должны быть перпендикулярны оптическим осям линз. Положение линз и экрана на оптической скамье отмечается по шкале указателями на рейтерах. Схема установки приведена на рис. 1.

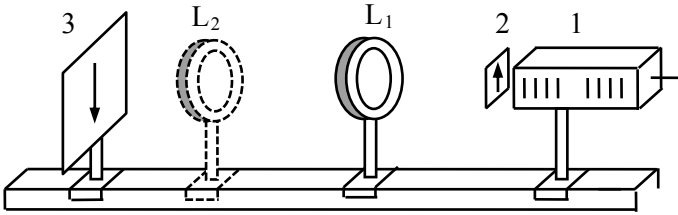


Рис. 1

Определение фокусного расстояния собирающей линзы методом непосредственного измерения

Для определения фокусного расстояния собирающей линзы используется метод непосредственного измерения. На оптической скамье устанавливают осветитель 1 с предметной диафрагмой 2 и экран 3, между ними помещают рейтер с собирающей линзой L_1 (линза L_2 в этом опыте не используется), как показано на рис. 1.

Перемещая линзу L_1 , находят такое ее положение, при котором получается наиболее резкое изображение предмета – стрелки. По шкале оптической скамьи измерить расстояния d и f (рис. 2) с учетом направления хода лучей и вычислить фокусное расстояние по формуле тонкой линзы, преобразовав ее к виду:

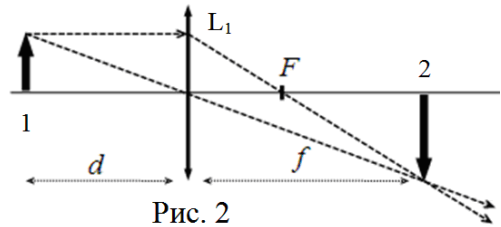


Рис. 2

$$F = \frac{fd}{d - f}. \quad (1)$$

Таблица 1

№	d , м	f , м	F , м	$F_{\text{ср}}$, м	ΔF , м	$\Delta F_{\text{ср}}$, м	$\Delta F_{\text{ср}} / F_{\text{ср}}$
1							
2							
3							
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		

Опыт провести 6-8 раз как для уменьшенного, так и для увеличенного изображения предмета. Результаты занести в таблицу 1.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы методом Аббе

Если поперечные (относительно главной оптической оси линзы) размеры предмета и его изображения соответственно равны AB и A_1B_1 , то

их отношение $k = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{f}{d}$ называется поперечным линейным увеличением линзы. Для действительного изображения $k < 0$, так как f и d имеют разные знаки (отсчитываются в противоположных направлениях от линзы).

Преобразуем формулу тонкой линзы в следующий вид:

$$F = \frac{fd}{d-f} = \frac{f}{1-f/d} = \frac{f}{1-k}$$

откуда

$$f = (1-k)F \quad (2)$$

Для двух различных положений линзы L_1 , осветителя (предмета) и экрана (изображения) на оптической скамье будем иметь соответственно:

$$f_1 = (1-k_1)F$$

$$f_2 = (1-k_2)F$$

Вычитая почленно из одного уравнения другое, получим:

$$F = \frac{f_1 - f_2}{k_2 - k_1} \quad (3)$$

Таблица 2

№	AB	A ₁ B ₁	k	f	F	ε	ΔF
1							
⋮							
6							
средние значения							

Собрать установку согласно рис. 1. Перемещением линзы и экрана добиться четкого изображения предмета. Масштабной линейкой измерить размеры предмета и изображения. По линейке измерить расстояние f . Фокусное расстояние линзы вычислить по формуле (3). Опыт повторить 5-6 раз. Результаты измерений занести в табл. 2.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя

Ввиду того, что положение оптического центра толстой линзы не всегда легко определимо, расстояния f и d находят не непосредственно, а косвенно, используя метод перемещения линзы.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы по методу её перемещения сводится к следующему. Если расстояние от осветителя (предмета) до экрана (изображения) больше $4F$, то всегда найдутся два таких положения линзы (рис. 3), при которых на экране получается отчетливое изображение предмета: в одном случае увеличенное, а в дру-

гом – уменьшенное.

За начало отсчета принимаем центр линзы, тогда $d_1 < 0$ и $d_2 < 0$, так как отсчитываются против хода луча. Учитывая знаки d и f , можем записать:

$$f_1 = -d_2 \text{ и } f_2 = -d_1 \quad (4)$$

Тогда расстояние l , на которое смещается линза при получении двух четких изображений на экране, равно

$$l = f_2 - f_1 = d_2 - d_1. \quad (5)$$

Расстояние между предметом и изображением остается неизменным:

$$z = f_1 - d_1 = f_2 - d_2. \quad (6)$$

Решая совместно (5) и (6) при выполнении условия (4), получим:

$$f = \frac{z+l}{2} \text{ и } d = -\frac{z-l}{2} \quad (7)$$

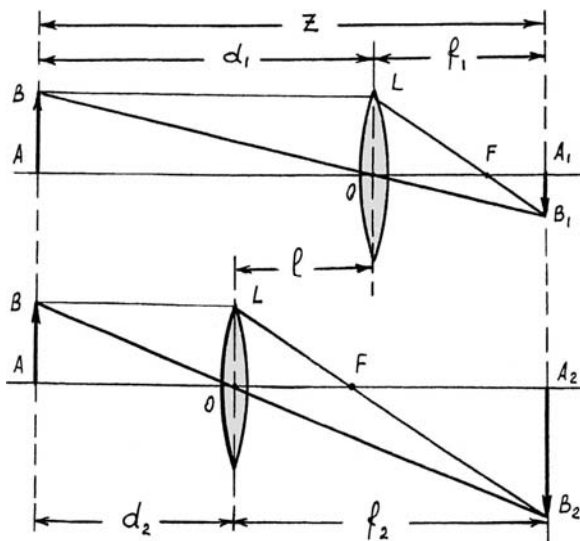


рис. 3

Из формулы тонкой линзы, с учетом (7), находим:

$$F = \frac{(z+l)(z-l)}{4z}. \quad (8)$$

Собрать установку согласно рис. 1. Перемещением линзы найти два таких положения, при которых получают четкое увеличенное и уменьшенное изображения, и по линейке измеряют l и z . Опыт провести 5-6 раз для различных расстояний z . Результаты измерений занести в таблицу 3. Фокусное расстояние рассчитать по формуле (8).

№	z	l	F	ε	ΔF
1					
⋮					
6					
средние значения					

**Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы
методом вспомогательной линзы**

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы усложняется тем, что она не дает действительного изображения предметов. Эту трудность преодолевают использованием вспомогательной собирающей линзы.

Собрать установку согласно рис. 4. Найти положение собирающей линзы L_1 , при котором на экране получается четкое изображение A_1B_1 . По шкале оптической скамьи отметить положение экрана. Затем на пути лучей, выходящих из собирающей линзы L_1 , поместить исследуемую рассеивающую линзу L_2 и, перемещая экран (или экран и линзу L_2), найти такое его новое положение (рис. 4), при котором вновь получается четкое изображение предмета A_2B_2 .

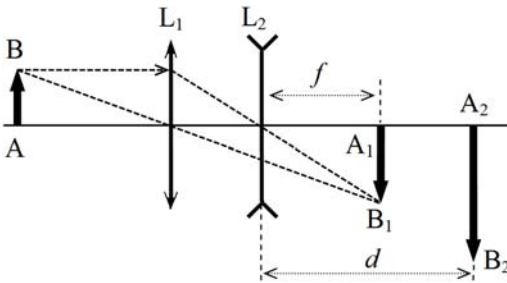


рис. 4

Вследствие обратимости хода лучей можно рассматривать лучи, дающие изображение A_1B_1 , как лучи, распространяющиеся от предмета A_2B_2 . Тогда изображение A_1B_1 – есть мнимое изображение предмета A_2B_2 , поэтому расстояние от линзы L_2 до A_1B_1 равно f , а от линзы L_2 до A_2B_2 – равно d .

Эти величины измеряются непосредственно при проведении опыта.

Фокусное расстояние рассеивающей линзы определить по формуле (1). При вычислениях необходимо учитывать, что «предметом» является изображение A_2B_2 , т. е. расстояния d и f отсчитываются против хода лучей (т. е. $d < 0$ и $f < 0$).

Выполнить измерения для 4-6 положений линзы L_2 . Результаты занести в таблицу 4.

№	d , м	f , м	F , м	ΔF , м	$\Delta F / F$
1					
⋮					
6					
средние значения					

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы методом параллельного пучка

Если лучи света падают на рассеивающую линзу параллельно её главной оптической оси, то после преломления они распространяются так же, как и от точечного источника, расположенного в фокусе этой линзы. Продолжив прямые, вдоль которых распространяются такие лучи, до пересечения, можно найти фокус и фокусное расстояние рассеивающей линзы.

В осветителе вместо предметной диафрагмы (стрелки) устанавливается диафрагма с малым круглым отверстием. Собрать установку согласно рис. 1. Если малое отверстие диафрагмы находится в фокусе собирающей линзы L_1 , то диаметр D_1 светлого пятна остается неизменным при любом положении экрана. Перемещая экран вдоль всей скамьи, убедиться в параллельности светового пучка.

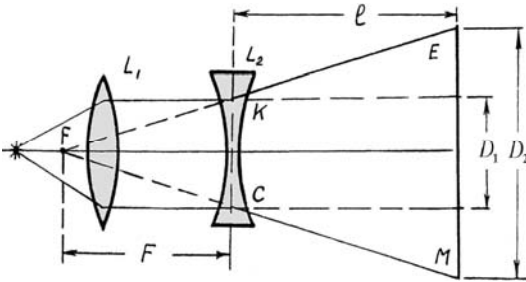


рис. 5

l между линзой L_2 и экраном (рис. 5) можно вычислить фокусное расстояние рассеивающей линзы.

Из треугольников FKC и FEM имеем:

$$\frac{F+l}{F} = \frac{D_2}{D_1},$$

откуда

$$F = \frac{D_1}{D_2 - D_1} l \quad (9)$$

Измерения и вычисления провести 4-5 раз при различных положениях линзы L_2 и экрана. Результаты измерений занести в таблицу 5.

Между линзой L_1 и экраном устанавливается рассеивающая линза L_2 . Диаметр пятна при этом увеличивается и становится равным D_2 . Измеряя диаметры световых пятен на экране без рассеивающей линзы (D_1) и с рассеивающей линзой (D_2), а также расстояние

Таблица 5

№	D_1	D_2	l	F	ε	ΔF
1						
⋮						
5						
средние значения						

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы отражения и преломления.
2. Нарисуйте ход лучей, падающих на сферическую преломляющую поверхность.
3. Какие линзы называются тонкими? Выведите формулу тонкой линзы.
4. Дайте определения основных точек, линий и плоскостей, характеризующих тонкую линзу (оптический центр, оптическая ось, фокус, фокальная плоскость).
5. Постройте изображение светящейся точки, лежащей на главной оптической оси, лежащей за двойным фокусным расстоянием.
6. Назовите основные недостатки (абберации) линз.
7. Объясните порядок выполнения работы по определению фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз.

Лабораторная работа № 27

Изучение закона освещенности с помощью фотоэлемента

Цель работы: Изучить основные положения фотометрии. Проверить экспериментально основной закон освещенности.

Описание установки

Установка для изучения законов освещенности (рис. 1) состоит из сменного передвижного источника света 1, селенового фотоэлемента 2, установленного в оправе. Отсчет угла поворота фотоэлемента осуществляется по угловой шкале 3, расположенной на корпусе оправы. Величина фототока измеряется гальванометром 4.

Селеновый фотоэлемент представляет собой систему, состоящую из металлической подложки, на одной стороне которой нанесен слой селена толщиной $0,05 \div 0,1$ мм. Этот слой покрыт полупрозрачным электродом, который прозрачен в видимой области спектра. Фотоэлемент имеет спектральную характеристику чувствительности, весьма близкую к кривой видимости глаза человека. Это обстоятельство очень важно, так как позволяет использовать его для фотометрических измерений дневного света. Фототок, возникающий при освещении фотоэлемента, пропорционален его освещенности.

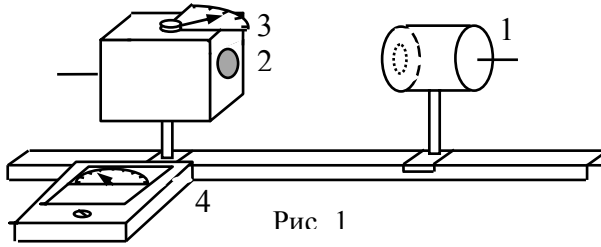


Рис. 1

Опыт 1. Проверка зависимости освещенности от расстояния до источника света

1. Селеновый фотоэлемент устанавливают перпендикулярно оптической скамье, при этом ручка поворота фотоэлемента должна находиться на отметке "0°".
2. Источник света устанавливают на расстоянии 15÷20 см от фотоэлемента и включают лампу накаливания, при этом стрелка гальванометра должна установиться во второй половине шкалы прибора. Показания гальванометра n (в делениях шкалы) заносят в таблицу 1.
3. Расстояние r между осветителем и фотоэлементом изменяют не менее 5-6 раз. Для каждого расстояния r снимают показания гальванометра n . Показания гальванометра n_{ϕ} при выключенном источнике света обусловлено освещением фотоэлемента внешними посторонними источниками света и называется световым фоном, его замер производится при каждом новом положении осветителя.

Таблица 1

№	r , см	r^2 , см ²	$1/r^2$, см ⁻²	n_{ϕ}	n	$\Delta n = n - n_{\phi}$
1						
2						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n						

4. По полученным результатам строят графики зависимостей $\Delta n = f(r^2)$ и $\Delta n = f(1/r^2)$.

Опыт 2. Проверка зависимости освещенности от угла падения лучей

1. Плоскость селенового фотоэлемента устанавливают перпендикулярно оптической скамье.
2. Перемещают осветитель до тех пор, пока стрелка гальванометра не займет положения около последнего значения деления шкалы.
3. Изменяют угол наклона фотоэлемента к лучам в пределах 0÷90° и через каждые 10÷15° снимают показания гальванометра. Результаты за-

носят в таблицу 2.

4. По полученным результатам строятся графики зависимостей $\Delta n = f(i)$ и $\Delta n = f(\cos i)$.

Таблица 2

№	i	$\cos i$	n_{ϕ}	n	$\Delta n = n - n_{\phi}$
1					
2					
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
n					

5. Анализируя полученные графики, сделать вывод о выполнимости основного закона освещённости.

Контрольные вопросы

1. Природа света (электромагнитная волна, квант).
2. Длины волн видимого диапазона, границы спектра.
3. Кривая относительной спектральной чувствительности глаза человека.
4. Энергетические и фотометрические характеристики.
5. Основной закон освещённости.
6. Объясните порядок смены времен года на разных географических широтах.
7. Какой вид имеют графики зависимостей $\Delta n = f(r^2)$ и $\Delta n = f(1/r^2)$?
8. Какой вид имеет график зависимости $\Delta n = f(i)$ и $\Delta n = f(\cos i)$?

Лабораторная работа № 28

Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля

Цель работы: Изучение классического опыта Юнга по интерференции света от двух когерентных источников.

Теория метода

Бипризма БП представляет собой две одинаковые призмы с малыми преломляющими углами, сложенные своими основаниями.

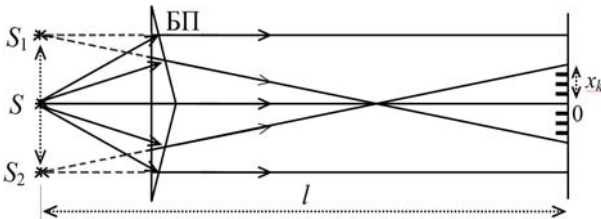


Рис. 1

Пучок света, падающий на БП от щелевой диафрагмы источника S

(рис. 1), вследствие преломления в бипризме, разделяется на два перекрывающихся пучка, как бы исходящими от двух мнимых источников S_1 и S_2 . За бипризмой, во всей области наложения пучков света, будет наблюдаться интерференционная картина в виде чередующихся параллельных светлых и темных полос. В случае белого света полосы будут радужными.

Для определения длины световой волны воспользуемся формулой:

$$\lambda = \frac{d}{l} \Delta x, \quad (1)$$

где Δx – ширина интерференционной полосы.

Пользуясь этой формулой, можно экспериментально определить длину волны монохроматического света. В данной работе Δx отсчитывают по шкале окуляр-микрометра. Расстояние d между мнимыми источниками S_1 и S_2 измеряется косвенным методом, используя собирающую линзу (рис. 2).

Если между бипризмой и экраном поместить собирающую линзу, то при некотором ее положении в поле зрения окуляр-микрометра получается четкое изображение двух мнимых источников S_1' и S_2' .

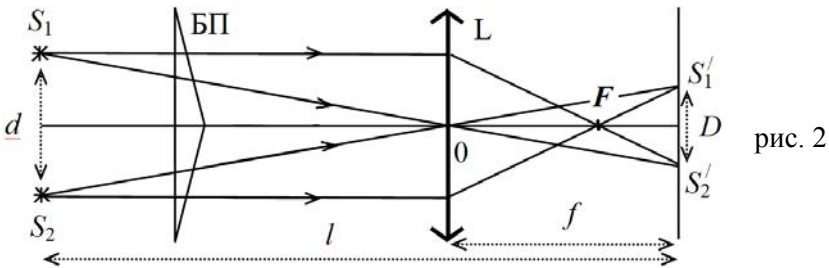


рис. 2

Из принципа построения изображения мнимых источников следует, что треугольники S_1S_2O и $S_1'S_2'O$ подобны, т. е. $\frac{d}{D} = \frac{l-f}{f}$, откуда

$d = \frac{l-f}{f} D$. Подставляя полученное выражение в (1), получим

$$\lambda = \frac{l-f}{l \cdot f} D \Delta x. \quad (2)$$

Для выполнения работы на оптической скамье собирается установка согласно рис. 3.

Экспериментальная часть

Опыт 1. Определение расстояния между мнимыми источниками.

1. При убранной линзе L располагают на оптической скамье приборы вдоль оптической оси так, чтобы в поле зрения окуляр-микрометра 3 на-

блюдалась четкая интерференционная картина. Картина интерференции наблюдается в том случае, когда щелевая диафрагма 2 открыта минимально и параллельно преломляющему ребру бипризмы БП. Если картина размыта или очень бледная, то необходимо изменить ширину щели, а ее поворотом вокруг горизонтальной оси добиться параллельности с преломляющим ребром бипризмы.

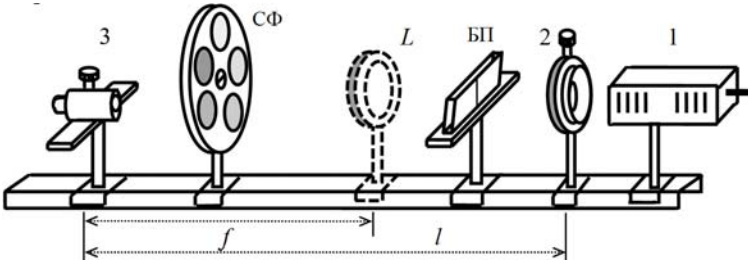


рис. 3

2. Добившись четкой интерференционной картины, устанавливают один из светофильтров СФ, а между окуляр-микрометром 3 и бипризмой помещают собирающую линзу L . Перемещением рейтера с линзой вдоль оптической скамьи добиваются четкого изображения двух мнимых источников (щелей) в поле зрения окуляр-микрометра. Если расстояние между щелевой диафрагмой и шкалой окуляр-микрометра мало, то добиться четкого изображения щелей невозможно. В этом случае необходимо увеличить расстояние l .

3. По шкале и микрометрическому барабану окуляр-микрометра измерить расстояние D между мнимыми изображениями щелей (см. рис. 2, цена деления шкалы в поле зрения – 1 мм). По шкале оптической скамьи измерить расстояния f и l .

4. Результаты измерений занести в таблицу.

Опыт 2. Определение длины световой волны.

1. Не изменяя положение приборов на оптической скамье, убирают линзу L . Если приборы расположены вдоль оптической оси, то в поле зрения окуляр-микрометра оказывается четкая интерференционная картина. В противном случае микровинтом переместить окуляр-микрометр в направлении, перпендикулярном оптической скамье (оптической оси), до получения интерференционной картины.

2. По шкале и микрометрическому барабану окуляр-микрометра измеряют ширину интерференционной полосы x для различных порядков интерференционных полос.

3. Вычисляют длину световой волны для каждого спектрального цвета по формуле (2).

4. Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу.

№	Светофильтр	l	f	D	Порядок спектра	Δx	λ
1							
2							
3							
4							
5							

Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция? Каковы условия, необходимые для получения интерференционной картины?
2. Методы получения интерференции света. Показать ход лучей в этих методах.
3. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников (классический опыт Юнга).
4. Что понимается под оптическим путем и оптической разностью хода лучей?
5. Напишите уравнение плоской бегущей монохроматической волны.
6. Объясните, почему в повседневных условиях не наблюдается устойчивых интерференционных картин.
7. Нарисуйте расположение и объясните назначение устройств, используемых в данной лабораторной работе.

Лабораторная работа № 29

Зеркало Ллойда

Цель работы: Экспериментальное определение толщины стеклянной пластинки путем исследования интерференционной картины.

Интерференция в плоскопараллельных пластинках

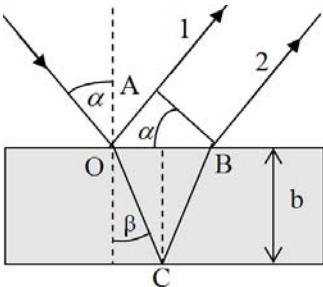


рис. 1

При падении световой волны на тонкую прозрачную плоскопараллельную пластинку или пленку происходит отражение от обеих поверхностей пластинки (рис. 1). В результате возникают когерентные световые волны, которые могут интерферировать между собой.

Рассмотрим только два когерентных параллельных пучка света, отбрасываемых пластинкой вверх. Первый луч образуется за счет отражения от верхней поверхности пластинки (луч 1), а второй луч от нижней поверхности (луч 2).

Проведем перпендикулярно к лучам 1 и 2 плоскость AB . *Оптическая разность хода* лучей 1 и 2 равна

$$\Delta = nS_2 - S_1, \quad (1)$$

где $S_2 = OC + CB$; $S_1 = OA$; n – показатель преломления пластинки.

Из рисунка видно, что $OC = b/\cos\beta$, а $OA = OB \cdot \sin\alpha = 2b \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \sin\alpha$, поэтому оптическая разность хода равна $\Delta = 2nb/\cos\beta - 2b \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \sin\alpha$.

Выразим вначале оптическую разность хода Δ через угол преломления β .

Т. к. $\sin\alpha = n \cdot \sin\beta$, то $\Delta = 2nb \cdot \cos\beta$.

Вновь введем угол падения:

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}.$$

С учетом потери полуволны при отражении световой волны от границы раздела с оптически более плотной средой (точка O), получим

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} - \frac{\lambda}{2}.$$

При отражении от среды оптически менее плотной (точка C) потери полуволны не происходит. Если на пути пучков 1 и 2 поставить собирающую линзу, они сойдутся в одной из точек фокальной плоскости линзы, и будут интерферировать. Результат интерференции зависит от значения Δ , оптической разности хода. При значении $\Delta = 2m\lambda/2$ получим максимум, а при значении $\Delta = (2m+1)\lambda/2$ – минимум интенсивности света. Таким образом, условия максимума и минимума интенсивностей в отраженном свете соответственно имеют вид:

$$2b\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}; \quad (2)$$

$$2b\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = 2m\frac{\lambda}{2}; \quad (3)$$

где m – порядок интерференционного максимума или минимума.

Из формул (2) и (3) следует, что оптическая разность хода при $b = \text{const}$ зависит от наклона лучей (угла α), поэтому, если такую пластинку осветить монохроматическим пучком лучей, падающих на пластинку под разными углами, то каждому значению α будет соответствовать определенная разность хода. Все лучи, имеющие одинаковый наклон, будут давать одну и ту же разность фаз. Следовательно, *max* и *min* будут располагаться по направлениям, соответствующим одинаковому наклону лучей, поэтому они называются *линиями равного наклона*.

Описание экспериментальной установки

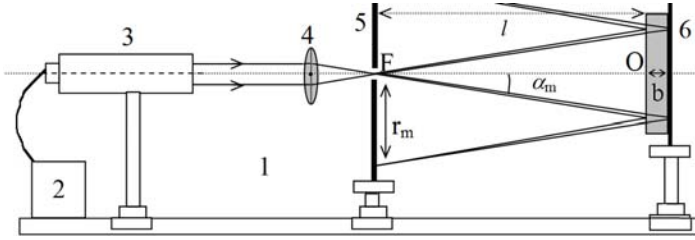


рис. 2

Принципиальная схема установки показана на рис. 2. Линза 4 с малым фокусным расстоянием собирает параллельный пучок лучей лазера 3 в своем фокусе F .

Расходящийся из F световой конус достигает плоскопараллельной стеклянной пластины 6. Отраженные от передней и задней поверхности пластины световые пучки дают интерференционную картину в виде концентрических колец на экране 5.

Интерференционная картина полос равного наклона, в принципе, локализуется на бесконечности. В данной работе картина наблюдается на достаточно удаленном экране при $l \gg b$. Это условие выполняется в установке.

При выполнении работы измеряются радиусы интерференционных колец на экране 5 (рис. 2) и расстояние l от плоскости экрана до поверхности стеклянной пластинки.

Вывод рабочей формулы

Из рисунка видно, что $\operatorname{tg} \alpha_m \approx \alpha_m \approx r_m / 2l$, ввиду условия малости угла α_m . Преобразуем формулу (3) с учетом данного условия:

$$\begin{aligned} 2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_m} &= 2bn\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_m}{n^2}} \approx 2bn\left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{2n^2}\right) \approx \\ &\approx 2bn\left(1 - \frac{\alpha_m^2}{2n^2}\right) = 2bn\left(1 - \frac{r_m^2}{8n^2 l^2}\right). \end{aligned}$$

Т. е. *оптическая разность хода* равна $\Delta = 2bn\left(1 - \frac{r_m^2}{8n^2 l^2}\right)$.

Условия для минимума (3) интенсивности света на экране примет вид:

$$2bn\left(1 - \frac{r_m^2}{8n^2 l^2}\right) = m\lambda.$$

Запишем это уравнение для радиусов двух колец под номерами k и p .

$$\begin{cases} 2bn \left(1 - \frac{r_k^2}{8n^2 l^2} \right) = k\lambda; \\ 2bn \left(1 - \frac{r_p^2}{8n^2 l^2} \right) = p\lambda. \end{cases}$$

Вычтем второе уравнение из первого и преобразуем:

$$b = \frac{4(p-k)\lambda n l^2}{r_p^2 - r_k^2}. \quad (4)$$

Формула (4) является расчетной при выполнении лабораторной работы. Т. о., для определения толщины зеркала необходимо измерить несколько радиусов интерференционной картины и расстояние от зеркала до экрана.

Порядок выполнения работы

В качестве источника монохроматического излучения используется газоразрядный гелий-неоновый лазер ЛГН-208Б.

Внимание!!! Остерегайтесь прямого попадания света лазера в глаза.

Не заглядывайте в выходное отверстие в экране!!!

№	λ , нм	n	l	r_k	r_p	b
1	632,8	1,5				
2						
3						
4						
5						
среднее значение						

1. Подготовить таблицу.
2. Прикрепить лист бумаги в клетку с отверстием для прохождения луча лазера через экран 5.
3. Отметить карандашом положение радиусов нескольких колец.
4. Снять лист бумаги с экрана.
5. Измерить радиусы нескольких колец и занести в таблицу.
6. Для каждой пары радиусов вычислить толщину пластинки b и занести в таблицу.
7. Найти среднее значение b .

Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция? Каковы условия, необходимые для получения интерференционной картины?
2. Запишите уравнение колебательного процесса.

3. Как найти результирующую амплитуду и фазу при сложении двух колебаний одинаковой частоты?
4. Какие источники называются когерентными?
5. Выведите формулы (2) и (3).
6. Выведите рабочую формулу (5).
7. Объясните порядок выполнения работы.

Лабораторная работа № 30

Определение радиуса кривизны сферической линзы с помощью колец Ньютона

Цель работы: Исследование интерференции света в тонких пленках на примере колец Ньютона. Определение радиуса кривизны линзы.

Краткая теория метода

Кольца Ньютона (полосы равной толщины) возникают при отражении или прохождении света в месте контакта выпуклой и плоской поверхностей из-за оптической разности хода лучей при прохождении воздушного клина между плоской и выпуклой поверхностями.

Схема для получения колец Ньютона представлена на рис. 1. Плоско-выпуклая линза большого диаметра прижимается выпуклой стороной к плоской пластинке так, чтобы между ними образовался воздушный клин. Толщина этого клина зависит от расположения точки B .

На устройство падает параллельный пучок света. Хотя линза прозрачна для данного излучения, отражательная способность устройства различна в различных местах. Отражательная способность зависит от толщины воздушного клина между линзой и пластинкой.

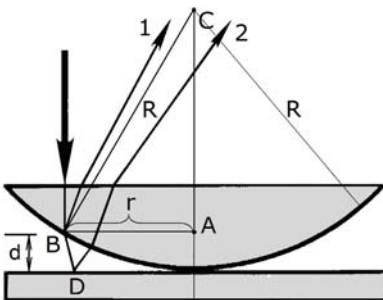


рис. 1

Луч 2, доходящий до точки B , частично отражается вверх, а частично проходит в воздушный клин. Отражаясь от пластинки в точке D , он возвращается обратно, и интерферирует с лучом 1, отраженным в точке B . В точке D происходит отражение от среды оптически более плотной, поэтому происходит потеря половины длины волны. Оптическая разность хода между первым и вторым лучами будет:

$$\Delta = 2d + \lambda/2.$$

Толщину клина найдем из прямоугольного треугольника ABC .

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = (2R - d) \cdot d \approx 2Rd. \quad \text{Или} \quad d = r^2/2R.$$

Подставив это выражение в формулу разности хода, получим

$$\Delta = r^2/R + \lambda/2$$

Радиусы для темных колец определим из условия интерференционных минимумов:

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \quad r_k = \sqrt{k \cdot \lambda \cdot R}, \quad (1)$$

где r_k – радиус k -го темного кольца.

Радиусы светлых колец найдем из условия интерференционных максимумов:

$$\Delta = k\lambda, \quad r_k = \sqrt{\left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda R}. \quad (2)$$

Счет темных колец начинается с $k = 0$, т. е. от самого центра интерференционной картины. Счет светлых колец начинается с $k = 1$.

Определив радиусы колец, можно, воспользовавшись формулой (1), найти радиус линзы.

$$R = \frac{r_k^2}{k \cdot \lambda}. \quad (3)$$

Так как радиусы колец Ньютона, возникающие при интерференции в системе пластинка-линза, сравнительно малы, то для их наблюдения и измерения применяется микроскоп с окуляр-микрометром. Установка для получения и наблюдения колец Ньютона в отраженном свете показана на рис. 2 (а).

В осветителе микроскопа свет от источника 1 проходит светофильтр 2, отражается от полупрозрачного зеркала ПЗ и, проходя через объектив микроскопа, параллельным пучком попадает на систему пластинка-линза. В окуляр-микрометре ОК наблюдаем картину интерференции в отраженном свете. На рис. 2 (б) приведена картина, видимая в поле зрения окуляр-микрометра.

Интерференционная картина рассматривается в микроскоп, поэтому кольца Ньютона будут видны в увеличенном виде. Коэффициент увеличения микроскопа в данной работе равен 8 (т. н. кратность объектива), поэтому, определив радиус кольца по шкале и микрометрическому барабану окуляр микрометра, полученное значение делят на коэффициент увеличения микроскопа, что будет соответствовать истинному (приведенному) радиусу кольца. Используемый в работе

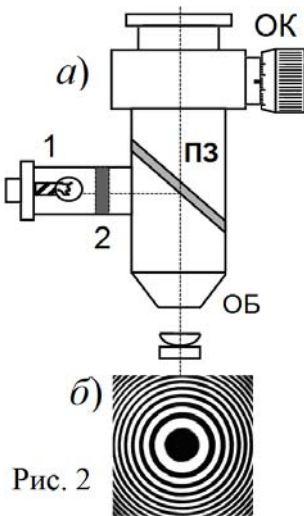


Рис. 2

светофильтр пропускает свет в области $\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7}$ м.

Порядок выполнения работы

1. Включают осветитель микроскопа в сеть и с помощью *кремальберных винтов* грубой и точной настройки получают резкое изображение колец Ньютона. Интерференционную картину колец устанавливают в центре поля зрения окуляр-микрометра.
2. С помощью шкалы и микрометрического барабана окуляр-микрометра измеряют диаметры колец. Находят их приведенные радиусы.
3. Вычисляют радиус кривизны линзы по формуле (3).
4. Измеряют диаметры всех хорошо наблюдаемых колец.
5. Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу.
6. Вывести формулу для оценки относительной погрешности и рассчитать её.

№ кольца	d наблюдаемый	$r = d / 16$ приведенный	R	ε	ΔR
1					
2					
3					
4					
средние значения					

Контрольные вопросы

1. Расскажите о методах получения когерентных источников.
2. Сформулируйте условие возникновения минимума и максимума интенсивности света интерференционной картины от двух когерентных источников.
3. Начертите ход лучей в системе пластинка-линза в отраженном свете и выведите формулу для определения радиусов темных и светлых колец.
4. Оптическая разность хода Δ двух интерферирующих волн монохроматического света равна $0,3\lambda$. Определить разность фаз $\Delta\varphi$.
5. Расстояние d между двумя щелями в опыте Юнга равно 1мм, расстояние l от щелей до экрана равно 3 м. Определить длину волны λ , испускаемой источником монохроматического света, если ширина b полос интерференции на экране равна 1,5 мм.
6. На мыльную пленку ($n = 1,3$) в воздухе, падает нормально пучок белого света. При какой наименьшей толщине d пленки отраженный свет с длиной волны $\lambda = 0,55$ мкм оказывается максимально усиленным?
7. Расстояние $\Delta r_{2,1}$ между вторым и первым темными кольцами Ньютона в отраженном свете равно 1 мм. Определить расстояние $\Delta r_{10,9}$ между десятым и девятым кольцами.

Лабораторная работа № 31

Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки

Цель работы: ознакомление с устройством и работой дифракционных решеток и методом измерения длины световой волны с их помощью.

Дифракционная решетка представляет собой ряд параллельных щелей одинаковой ширины a , разделенных непрозрачными промежутками шириной b . Сумма $a+b=d$ называется *периодом решетки* (рис. 1).

Пусть плоская монохроматическая волна падает на решетку. Каждая щель дает на экране дифракционную картину, т. е. посылает свет по всем направлениям. На центральной линии экрана все лучи сходятся в одинаковой фазе, их амплитуды складываются, и интенсивность центральной полосы будет в N^2 раз больше, чем для одной щели.

Рассмотрим две соседние щели (рис. 1). Лучи, идущие от двух соответствующих точек в направлении φ имеют одну и ту же разность хода $\Delta = d \cdot \sin \varphi$. Резкое возрастание амплитуды будет по тем направлениям, для которых разность хода кратна целому числу длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda, \quad \text{где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1)$$

Это условие определяет положение главных максимумов и называется формулой дифракционной решетки.

На рис. 2 схематически изображена лабораторная установка. ДР – дифракционная решетка, на которую падает параллельный пучок лучей от осветителя S, l – расстояние от решетки до экрана Э, x_k – расстояние между центральной частью нулевого максимума и одной из полос дифракционной картины k -го порядка.

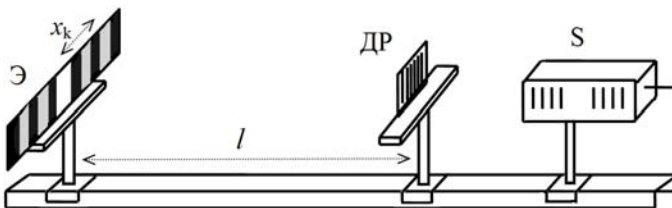


рис. 2

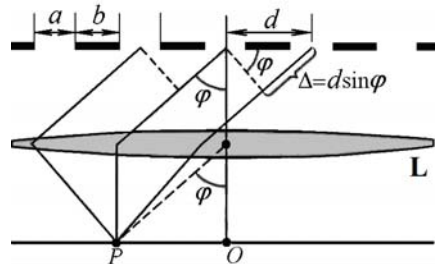


Рис. 1

Для определения длины волны λ по формуле (1) необходимо знать значение $\sin\varphi$. Учитывая, что $l \gg x$, получим $\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi = x/l$. Тогда, подставив в (1) и преобразовав, получим

$$\lambda = \frac{xd}{lk}, \quad (2)$$

где $d=10^{-5}$ м – постоянная дифракционной решетки, используемой в работе.

Порядок выполнения работы

1. Осветитель, дифракционную решетку и экран установить таким образом, чтобы на экране наблюдалась отчетливая дифракционная картина.
2. Измерить расстояние l от экрана до дифракционной решетки.
3. Измерить линейкой на экране расстояния x_k между центром нулевого максимума и центром красной полосы спектра 1-го порядка. Вычислить $x_{\text{ср}}=(x_{\text{прав}} + x_{\text{лев}})/2$ и занести в таблицу.
4. Выполнить пункт 3 для остальных цветов спектра 1-го порядка.
5. Выполнить пункты 3 и 4 для спектра 2-го порядка.
6. По формуле (2) рассчитать длину волны всех цветов. Результаты вычислений занести в таблицу.

l	Цвет	Порядок	$x_{\text{прав.}}$	$x_{\text{лев.}}$	$x_{\text{ср}}$	λ	$\lambda_{\text{ср.}}$
	красный	1					
		2					
	желтый	1					
		2					
	зелёный	1					
		2					
синий	1						
	2						

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление дифракции?
2. Объясните явление дифракции от одной щели. Выведите формулы для дифракции на щели.
3. Что представляет собой дифракционная решетка? Что такое период дифракционной решетки? Выведите формулу (1). Как возникают главные максимумы дифракционной решетки?
4. Сформулируйте условие Релея для дифракционной решетки и выведите формулу разрешающей способности.
5. Выведите рабочую формулу (2).
6. Объясните порядок выполнения работы.

Лабораторная работа № 32

Проверка закона Малюса

Цель работы: экспериментальным путем убедиться в справедливости закона Малюса.

Краткая теория

Будем изображать поляризатор в виде пластинки со штриховкой. Поляризатор максимально пропускает лучи плоскость колебаний электрического вектора, которых параллельна штриховке.

Пусть на пластинку из турмалина или герпатита падает естественный свет. Свет, выходящий из пластинки, будет поляризован, поэтому эта пластинка называется *поляризатором* (рис. 1). Чтобы убедиться в том, что свет поляризован, поставим на его пути еще одну пластинку, называемую в этом положении *анализатором*. Если плоскости пропускания поляризатора и анализатора параллельны, то свет при прохождении через анализатор почти не теряет своей интенсивности. Если же плоскости поляризатора и анализатора перпендикулярны друг другу, то свет не пройдет через анализатор. В этом случае говорят, что поляризатор и анализатор скрещены. В промежуточных случаях интенсивность света, прошедшего через систему зависит от угла между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

Обозначим амплитуду электрического вектора, прошедшего через поляризатор через E_0 . Плоскость пропускания анализатора

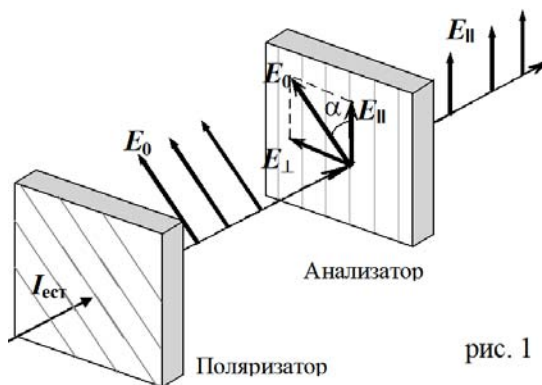


рис. 1

повернута относительно плоскости поляризатора на угол α . Разложим вектор E_0 на две составляющие: параллельно плоскости анализатора и перпендикулярно к ней. Составляющая параллельная плоскости анализатора пройдет через него, а перпендикулярная погасится. Из рис. 1 видно, что

$$E_{\parallel} = E_0 \cos \alpha.$$

Интенсивность электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды $I \sim E^2$, следовательно

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

Это простое выражение называется *законом Малюса*. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, равна произведению интенсивности света, прошедшего через поляризатор и квадрата косинуса угла между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

Описание экспериментальной установки

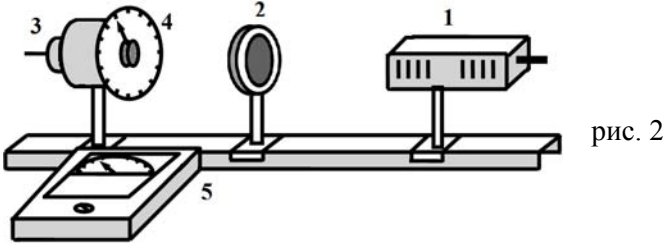


рис. 2

Установка для изучения явления поляризации изображена на рис. 2. На оптической скамье установлен осветитель 1, дающий естественный свет, поляризатор 2, фотоэлемент 3 с встроенным вращающимся анализатором 4. Интенсивность света, проходящего через анализатор, измеряется по шкале гальванометра 5.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу.
2. Установить стрелку анализатора 4 на деление 0° , при этом микроамперметр должен показывать максимальный ток (вторая половина шкалы прибора). Для изменения тока достаточно изменить расстояние между осветителем 1 и анализатором 4.

φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
I_φ																			
$I_{фон}$																			
$I_\varphi - I_{фон}$																			
I/I_{max}																			
$\cos^2 \varphi$																			

3. Указатель плоскости пропускания анализатора (стрелку анализатора) установить на деление 90° , при этом показания микроамперметра должны быть минимальны. Оставшееся отклонение стрелки микроамперметра указывает на наличие частичной поляризации света (нарушена ориентация оптических осей микрокристаллов турмалина или герпатита) поляроидов, либо на наличие рассеянного света от посторонних источников.

4. Изменить угол на 180° (пол оборота анализатора) через каждые 10° и занести соответствующие значения тока в таблицу (колонка « I_φ »).
5. Из всех значений тока I_φ вычесть величину фонового тока $I_{фон}$. Результирующее значение тока $I = I_\varphi - I_{фон}$ занести в колонку « I ».
6. Определить по таблице максимальное значение тока I_{max} .
7. Найти отношение I/I_{max} для каждого угла и занести в таблицу в колонку « I/I_{max} ».
8. Построить график №1 зависимости I/I_{max} от угла поворота φ .
9. Построить график №2 зависимости I/I_{max} от $\cos^2 \varphi$.
10. Анализируя полученные графики, сделать вывод о справедливости закона Малюса.

Контрольные вопросы

1. Представления о свете с точки зрения волновой теории. Чем отличается естественный свет от поляризованного?
2. Способы получения поляризованного света.
3. Объясните явление двойного лучепреломления.
4. Выведите закон Малюса.
5. Поляризаторы, анализаторы и принцип их действия.
6. Принцип работы сахариметра.
7. Объясните устройство экспериментальной установки и порядок выполнения работы.
8. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.
9. Расскажите о применении поляризации света в науке, технике, быту.

Лабораторная работа № 33

Проверка закона Брюстера

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость степени поляризации отраженного света от угла падения и определить показатель преломления диэлектрического зеркала.

Краткая теория

Для описания степени поляризации света при отражении пользуются понятием степени поляризации.

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Величины I_{\perp} и I_{\parallel} можно вычислить по формулам Френеля:

$$I_{\perp} = kI_0 \cdot \left[\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right]^2, \quad I_{\parallel} = kI_0 \cdot \left[\frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \right]^2,$$

где I_0 – интенсивность падающего света, I_{\perp} – интенсивность света отраженного от диэлектрика, колебания вектора напряженности электрического поля \vec{E} которого перпендикулярны плоскости падения, I_{\parallel} – интенсивность отраженного света, колебания вектора \vec{E} которого параллельны плоскости падения, i – угол падения, r – угол преломления, k – коэффициент пропорциональности, который имеет значение порядка 0,04.

График зависимости степени поляризации P от угла падения i представлен на рис. 1. График имеет максимум. Угол, при котором наблюдается максимум поляризации отраженного света, удовлетворяет закону Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}. \quad (2)$$

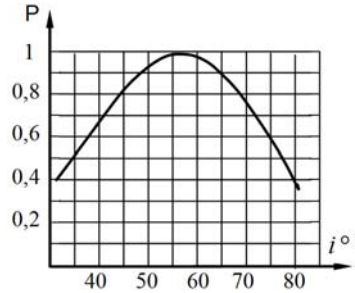


рис. 1

Описание установки

Установка для изучения закона Брюстера представляет собой гониометр 1, на котором установлен коллимированный источник света 2 (т. е. создающий параллельный пучок света), анализатор 3 и диэлектрическое зеркало 4, которое установлено на вращающемся столике в центре гониометра.

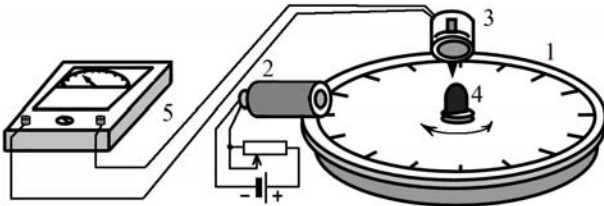


рис. 2

Параллельный пучок света от источника 2 падает на диэлектрическое зеркало 4 и, отразившись от него, попадает на фотоэлемент, находящийся в анализаторе 3. В анализаторе имеется поляризационная пленка. Пленку можно вращать и установить в положениях \perp (плоскость поляризации пленки перпендикулярна плоскости падения пучка света) и \parallel (плоскость поляризации пленки параллельна плоскости падения).

Устанавливая положения \perp или \parallel , измеряют ток фотоэлемента, создаваемый световыми потоками, падающими на зеркало под различными углами. Показания гальванометра (5) прямо пропорциональны значениям светового потока, т. е. $I_{\perp} = c \cdot I_{\perp}$, $I_{\parallel} = c \cdot I_{\parallel}$. Подставив эти соотношения в (1), получим формулу:

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Формула (3) является расчетной при выполнении лабораторной работы.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу.

№	α	i	I_1	I_2	P
1	65°				
2	80°				
·	·				
·	·				
11	165°				

- Вставить вилку шнура питания лабораторной установки в сеть.
- Установить угол α между осями источника света и анализатора 65°.
- Плоскость поляризации поляроида установить в положение « \perp ». Поворотом столика, на котором установлено диэлектрическое зеркало, добиться максимального отклонения стрелки гальванометра. Это наступает при равенстве углов падения и отражения. Угол α и ток гальванометра I_1 занести в таблицу.
- Не изменяя угла α , повернуть анализатор на 90°, т. е. поставить в положение « \parallel ». Показания гальванометра I_2 занести в таблицу.
- Установить угол α между осями источника света и анализатора в следующих положениях 65°, 80°, 95°, 105°, 110°, 115°, 120°, 125°, 135°, 150°, 165° и выполнить пункты 3 и 4.
- Построить график зависимости степени поляризации отраженного света от угла между осями источника света и анализатора $P = f(i)$.
- Из графика найти угол максимальной поляризации i_B . Поскольку угол α , равен сумме углов падения и отражения, то $i = \alpha/2$.
- По формуле (2) найти показатель преломления диэлектрического зеркала.

Контрольные вопросы

- Чем отличается естественный свет от поляризованного?
- В чем сущность явления поляризации света?
- В чем заключается явление полной и частичной поляризации при отражении от диэлектрического зеркала?
- Запишите формулу по которой определяется степень поляризации света?
- Выведите закон Брюстера. Каково взаимное расположение отраженного и преломленного луча при полной поляризации отраженного луча?

- ча?
6. Как использовать это явление для определения плоскости поляризации поляроидных пленок.
 7. Перечислите способы поляризации естественного света?
 8. Где используется явление поляризации света?

Лабораторная работа № 34

Определение постоянной Стефана-Больцмана по излучательной способности вольфрама

Цель работы: Экспериментально определить постоянную Стефана-Больцмана.

Теория метода

В данной работе в качестве излучающего тела используется нить лампы накаливания ЛН (рис. 1), обычно изготавливаемые из вольфрама. Вольфрам является хорошо изученным материалом. В диапазоне температур 400÷3000 К зависимость удельного сопротивления от температуры $\rho(T)$, имеет почти линейный характер и хорошо аппроксимируется зависимостью

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T), \quad (1)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление нити накала при 0 К. Для вольфрама в диапазоне 400÷3000 К коэффициент пропорциональности $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹.

Т. к. $r = \rho l / S$, то, помножив правую и левую часть соотношения (1) на l/S , получим зависимость сопротивление нити накала от температуры

$$r = r_0 (1 + \alpha t^\circ\text{C}). \quad (2)$$

Выразим температуру нити накала из формулы (2):

$$t^\circ\text{C} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right); \quad T = t^\circ\text{C} + 273,15. \quad (3)$$

Если тело не абсолютно черное, то его энергетическая светимость уменьшается по сравнению с энергетической светимостью абсолютно черного тела:

$$R = b \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (4)$$

где b – коэффициент серости, зависящий от природы тела, состояния его поверхности, температуры. В исследуемом в данной работе интервале температур коэффициент серости для вольфрама можно считать постоянным и равным $b = 0,15$.

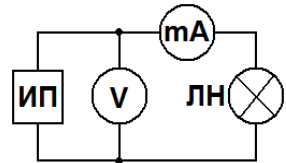


рис. 1

Зная температуру нити накала можно найти энергию, выделяемую нитью с единицы ее поверхности за единицу времени, т. е. найти энергетическую светимость:

$$R = \frac{\Delta W}{\tau \cdot \Delta S} = \frac{P}{\Delta S}, \quad (5)$$

где P – мощность, рассеиваемая лампой.

Нить накала излучает такую энергию, которую она получает от источника питания (ИП). По закону Джоуля-Ленца

$$P = I^2 \cdot r, \quad (6)$$

где r – сопротивление нити накала лампы, I – сила тока в нити накала.

Подставив в формулу (5) выражения (4) и (6), и выражая σ получим:

$$\sigma = \frac{I^2 \cdot r}{b \cdot T^4 \Delta S}. \quad (7)$$

Площадь поверхности нити накала $\Delta S = 2,15 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Сопротивление нити накала при $t = 273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ равно $r_0 = 30,466 \text{ Ом}$.

Выполнение работы

1. Подготовить таблицу.

№ п/п	U , В	I , мА	$r = \frac{U}{I}$	t , $^\circ\text{C}$	T , К	σ	$\Delta\sigma$	$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}}$	$\bar{\sigma} \pm \Delta\bar{\sigma}$
1									
2									
3									
4									
5									
средние значения									

2. Устанавливая значения напряжений на лампе накаливания **ЛН** ручкой регулировки на источнике питания **ИП**, указанных преподавателем, в колонке « U », снять показания миллиамперметра **mA** и занести их в колонку « I » учитывая единицы измерения этих величин по шкалам приборов.
3. Произвести все необходимые расчеты по формулам (3), (7) и заполнить таблицу.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение энергетической светимости. Единицы ее измерения.
2. Дайте понятие абсолютно черного тела. Модель абсолютно черного тела.
3. Дайте определения излучательной и поглощательной способности тела.
4. Запишите и объясните физический смысл законов Кирхгофа, Стефана-

Больцмана, смещения Вина, Релея-Джинса.

5. Сформулируйте гипотезу Планка.
6. Выведите формулу Планка.
7. Объясните методику определения в работе температуру нити накала лампы.
8. Как находится энергия, испускаемая нитью накала лампы?
9. Как определяется энергетическая светимость нити накала?
10. Что вы ожидали получить в данной работе? Совпадает ли полученное значение с табличным значением?

Лабораторная работа № 35

Изучение фотоэлектрического эффекта

Цель работы: экспериментальным путем определить постоянную Планка.

Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Свет от источника (ИС), располагаемого на оптической скамье, проходя через один из светофильтров (СФ) на турели, попадает в фотоэлемент (ФЭ), находящийся в непрозрачном кожухе. В работе используется сурмяно-цезиевый вакуумный фотоэлемент Ф-26. На стенку стеклянной колбы нанесен слой сурьмы, обработанный парами цезия. Этот слой является катодом. Чтобы большинство электронов попадало на анод, он размещается в центре колбы. В колбе создается вакуум порядка 10^{-6} мм.рт.ст., т. е. порядка 0,1 Па. Фототок, создаваемый фотоэлементом, измеряется микроамперметром, находящимся в верхней части измерительно-управляющего блока (на рис. не показан), на нём же устанавливается задерживающее напряжение, измеряемое вольтметром.

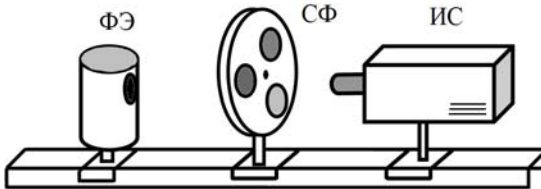


рис. 1

Вывод расчетной формулы

В 1905 году А. Эйнштейн, опираясь на гипотезу Планка о квантах, предложил объяснение, получившее название квантовой теорией фотоэффекта. Он показал, что все закономерности фотоэффекта легко объясняются, если предположить, что свет поглощается такими же порциями $\varepsilon = h\nu$, какими и испускается по гипотезе Планка. Часть этой энергии за-

трачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело, а остаток энергии идет на сообщение электрону кинетической энергии, т. е.

$$h\nu = A + \frac{m_e v^2}{2}, \quad (1)$$

где A – работа выхода электрона. Данное выражение называется законом фотоэффекта Эйнштейна.

Для обращения силы фототока в нуль, необходимо приложить между катодом и анодом задерживающее напряжение U_3 . Т. е. энергия задерживающего потенциального поля должна равняться кинетической энергии электрона:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU_3. \quad (2)$$

Из выражения (1) легко получить уравнения зависимостей запирающих напряжений от частоты, взяв значение кинетической энергии из (2):

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}. \quad (3)$$

Каждый электрон, выбиваемый из катода, получает некоторую скорость, зависящую от частоты падающего света. Установив между источником света и фотоэлементом фильтр, пропускающий частоту ν_1 , зависимость запирающего напряжения от частоты примет вид:

$$U_1 = \frac{h}{e}\nu_1 - \frac{A}{e}, \quad (4)$$

где U_1 – запирающее напряжение, при котором фототок при данном фильтре равен нулю. В случае установки фильтра с частотой пропускания ν_2 уравнение (3) примет вид:

$$U_2 = \frac{h}{e}\nu_2 - \frac{A}{e}, \quad (5)$$

где U_2 – запирающее напряжение, при котором ток фотоэлемента при данном фильтре равен нулю. Вычтем из уравнения (4) уравнение (5) и выразим из полученного выражения постоянную Планка h , получим:

$$h_{12} = \frac{e(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \nu_2}, \quad (6)$$

где $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Т. о., для экспериментального определения постоянной Планка необходимо измерить запирающие напряжения при двух светофильтрах с известной длиной волны пропускания.

В работе используются три светофильтра: фиолетовый, синий и желтый, поэтому можно найти три значения постоянной Планка, используя различные сочетания из трех по два.

Порядок выполнения работы

Перед выполнением экспериментов подготовить таблицу.

	Фиолетовый $\lambda_1 = 0,425 \cdot 10^{-6}$ м	Синий $\lambda_2 = 0,465 \cdot 10^{-6}$ м	Желтый $\lambda_3 = 0,565 \cdot 10^{-6}$ м
№	U_1	U_2	U_3
1			
2			
3			
Ср. значения			

1. Установить фиолетовый фильтр. Ручкой «Регулятор напряжений» установить такое напряжение, чтобы микроамперметр, находящийся в верхней части прибора, показывал «нуль».
2. Показание вольтметра занести в таблицу в соответствующее место.
3. Повернуть турель и установить синий светофильтр.
4. Выполнить указания пунктов 3 и 4.
5. Повернуть турель и установить желтый светофильтр.
6. Выполнить указания пунктов 3 и 4.
7. Сделать еще два полных оборота турели, произвести шесть измерений запирающего напряжения и занести в таблицу.
8. Вычислить средние значения напряжения при каждом светофильтре.
9. Используя связь длины волны с частотой $c = \lambda \nu$, вычислить значение частот ν_1, ν_2, ν_3 .
10. Воспользовавшись уравнением (6) из полученных экспериментальных данных найти три значения постоянной Планка
11. Найти среднее значение постоянной Планка по формуле

$$h_{cp} = \frac{h_{12} + h_{23} + h_{13}}{3}.$$
12. Сравнить полученное значение постоянной Планка с табличным значением и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называется фотоэффектом?
2. Нарисуйте электрическую схему установки Столетова.
3. От чего зависит запирающее напряжение?
4. Какие закономерности фотоэффекта не могли быть объяснены с помощью законов классической физики?
5. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
6. Что называется красной границей фотоэффекта?
7. Нарисуйте блок-схему установки.
8. Расскажите порядок выполнения работы и обработки результатов.

Лабораторная работа № 36

Проверка соотношения неопределенностей для фотонов

Цель работы: проверить соотношение неопределенностей для фотонов, исследуя дифракцию света на щели.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга

В классической механике состояние материальной точки определяется заданием ее координат и проекций импульса на оси координат. Эти величины называются динамическими переменными. Строго говоря, микрообъекты не могут быть приписаны указанные динамические переменные. Однако информацию о микрочастице мы получаем из результатов анализа ее взаимодействия с прибором, который является *макроскопическим*.

Своеобразие свойств микрочастиц проявляется в том, что не для всех переменных при одновременном измерении получаются определенные значения. Так, например, электрон не может иметь одновременно точных значений координаты x и проекции импульса p_x . Причем, принципиальной неточности следует ожидать даже в случае использования идеальных измерительных приборов.

Неопределенность значений Δx и Δp_x этих величин определяется выражением:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (1)$$

Такие же соотношения можно записать и для других пар проекций координат и импульсов частицы, которые называются *канонически сопряженными*. Эти соотношения были открыты в 1927 году В. Гейзенбергом.

Отметим, что предела для точности, с которой может быть измерена одна из двух переменных, не существует, если в этот момент мы полностью откажемся от знания другой переменной.

Соотношение неопределенности указывает, в какой мере можно использовать понятия классической механики применительно к микрочастицам, в частности, с какой точностью можно говорить о траектории микрочастиц. В практическом плане соотношение неопределенности позволяет оценить размеры атома, минимальную энергию электрона в атоме и произвести ряд других полезных оценок.

Мысленный опыт

Соотношение неопределенностей было получено Гейзенбергом в результате анализа мысленных опытов и, в частности, следующего.

Пусть слева на экран M со щелью падает пучок микрочастиц. Слева от экрана проекция импульса микрочастицы на ось x равна нулю, а неопределенность этой проекции $\Delta p_x = 0$. Координата x при этом совершенно неопределенна, а значит $\Delta x = \infty$.

Рассмотрим изменение Δx и Δp_x при дальнейшем движении микрочастицы. В экране имеется щель шириной a . Когда частица пройдет через щель, то ее координата x будет известна с точностью $\pm a/2$, т. е. неопределенность координаты Δx будет порядка a . Неопределенность проекции импульса на ось x уже не будет равна нулю. Оценим эту неопределенность.

При дифракции волны на щели положение первого минимума на экране определяется выражением

$$a \cdot \sin \varphi = \lambda. \quad (2)$$

Это означает, что после прохождения микрообъектом (электроном, фотоном и т. д.) щели он приобретет компоненту импульса, направленную вдоль оси x . Направление полного импульса будет лежать, в основном, в пределах угла $\varphi = \pm \arcsin(\lambda/a)$, т. к. частица вероятнее всего попадет в конус, в котором располагается первый максимум. Амплитуда вероятности попасть в первый максимум значительно больше амплитуд побочных максимумов.

Таким образом, после прохождения щели неопределенность проекции импульса на ось x будет равна

$$\Delta p_x = p_0 \cdot \sin \varphi,$$

где $p_0 = h/\lambda$ – модуль полного импульса частиц. Этот импульс остается неизменным при прохождении частицы через щель.

Найдем произведение $\Delta x \cdot \Delta p_x$. За щелью неопределенность координаты x равна $\Delta x \approx a$, неопределенность импульса $\Delta p_x = p_0 \cdot \sin \varphi$, поэтому

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx a \cdot p_0 \cdot \sin \varphi \approx a \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{a} \approx h.$$

Более тонкие рассуждения уточняют это соотношение до вида (1), где $\hbar = h/2\pi = 1,05459 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – называется *редуцированной (приведенной) постоянной Планка* или *постоянной Дирака*.

Экспериментальная часть

Для проверки соотношения неопределенностей используется явление дифракции фотонов на щели.

Неопределенность координаты x после прохождения щели равна $\Delta x \approx a$, неопределенность импульса $\Delta p_x = p_0 \cdot \sin \varphi$. Для определения $\sin \varphi$ рассмотрим рис. 1, где b – ширина первого максимума на экране, которая определяется двумя факторами: размерами щели a и расширением волны вследствие дифракции.

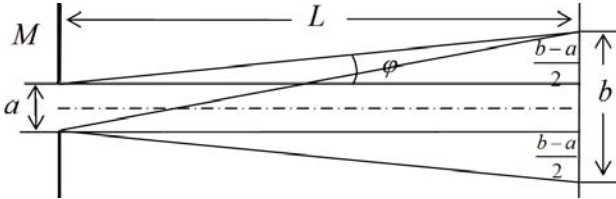


рис. 1

$$b = a + 2b \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Из рисунка видно, что $\operatorname{tg} \varphi = (b-a)/(2 \cdot L)$. При малых φ можно воспользоваться соотношением $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$, поэтому $\Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{b-a}{2 \cdot L}$.

Учитывая, что в нашей работе $a \ll b$, запишем окончательную формулу

$$\Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{b}{2 \cdot L}. \quad (3)$$

Экспериментальная установка

Работа выполняется на установке, общий вид которой приведен на рис. 2. Свет от гелий-неонового лазера 1 (ЛГН-208Б с длиной волны 632,8 нм) через регулирующую по ширине щель 2 попадает на экран 3, на котором наблюдается дифракционная картина. Вся система расположена на оптической скамье 4.

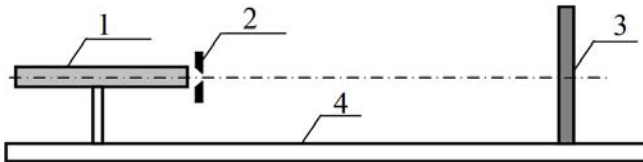


рис. 2

Порядок выполнения работы

1. На расстоянии порядка $L = 1$ м от лазера со щелью установить экран.
2. Прикрепить к экрану лист чистой бумаги в клетку.
3. Включить лазер в сеть.
4. Микровинтом плавно закрыть щель и заметить по шкале индикатора перемещений момент полного исчезновения картины на экране. Полученное значение на шкале индикатора будет началом отсчета ширины.

- рины щели a .
- Плавнo открывая щель с шагом $0,01 \div 0,02$ мм, измерить зависимость ширины центрального максимума дифракционной картины b от ширины щели a .
 - Результаты занести в таблицу.

№	L	a	b	Δp_x	$\Delta p_x \cdot \Delta x$
1					
2					
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
10					

- Проверить справедливость соотношения неопределенностей для фотона (1), имея ввиду, что $\Delta x \approx a$.

Контрольные вопросы

- Сформулируйте гипотезу де Бройля.
- Запишите и поясните соотношение неопределенностей Гейзенберга.
- Проанализируйте мысленный опыт по дифракции микрочастицы на щели.
- Выведите расчетную формулу (3).
- Объясните порядок выполнения работы.
- Объясните полученные результаты. Выполняется ли соотношение неопределенностей в проделанных опытах?

Лабораторная работа № 37

Изучение спектра излучения водорода

Цель работы: Определить экспериментально все линии видимой части спектра водорода. Вычислить постоянную Ридберга.

Устройство и принцип работы монохроматора МУМ

Монохроматор МУМ универсальный малогабаритный прибор, предназначенный для выделения монохроматического излучения, исследования источников света, приемников излучения, решения аналитических задач и других работ в области спектра $200 \div 800$ нм.

Оптическая схема монохроматора приведена на рис. 1. Излучение от источника света 1 через конденсор 2 попадает на входную щель 3 и, отразившись от вогнутой дифракционной решётки 4, которая играет

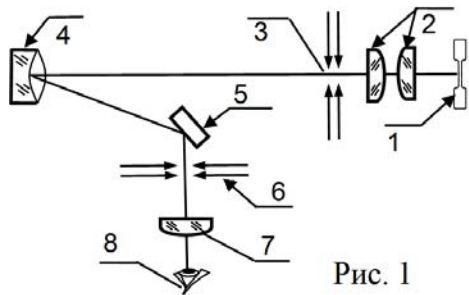


Рис. 1

роль фокусирующего и диспергирующего элемента и, отразившись от зеркала 5, проходя через выходную щель 6 и окуляр 7 попадает в глаз наблюдателя 8.

В приборе применена решётка с переменным шагом нарезки и криволинейными штрихами, что даёт возможность существенно уменьшить различные погрешности, возникающие при работе спектрального аппарата.

Направление на щель света определённой длины волны осуществляется поворотом решётки 4 вокруг оси. Поворот осуществляется рукояткой, расположенной на торцевой стенке монохроматора. Рукоятка приводит в действие также механический счётчик с цифровым отсчётом. Счётчик показывает длину волны в нанометрах (10^{-9} м).

Трубка Гейслера

В качестве источника света используется трубка Гейслера, наполненная водородом. Трубка (рис. 2) состоит из двух стеклянных баллонов (B_1 , B_2), соединенных между собой капиллярной трубкой (КТ). Длина трубки Гейслера не превышает 200 мм. Трубка имеет четкий линейчатый спектр и предназначена для изучения спектров газов.

На концах баллонов сварены электроды (\mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2), выводы которых припаяны к металлическим цоколям, имеющим уши (У) для присоединения проводов.

При подаче на трубку соответствующего напряжения (около $2\div 3$ кВ), она работает в течение 45 минут без выхода из строя.

Изделие необходимо оберегать от ударов и падений.

Запрещается устанавливать и снимать спектральные трубки при включенном высоковольтном генераторе. Высокое напряжение опасно для жизни !!!

Блок-схема установки

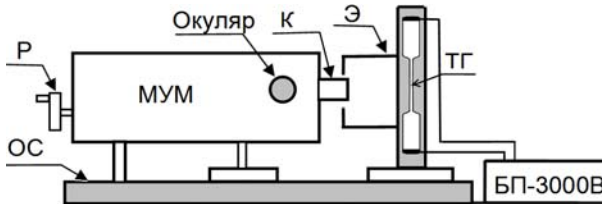


рис. 3

Экспериментальная установка состоит из следующих частей: МУМ – универсальный монохроматор, ТГ – трубка Гейслера с водородом, БП – блок питания 3000 В, Э – светонепроницаемый экран, К – конденсор,

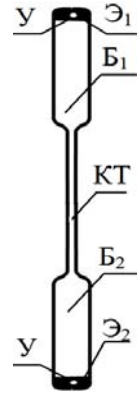


рис. 2

ОС – оптическая скамья, Р – рукоятка для наведения на спектральную линию, рядом с которой расположен счетчик длины волны в нм.

Порядок выполнения работы

- Для облегчения нахождения линий с помощью монохроматора, вычислите по формуле $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ длины волн первых четырех линий серии Бальмера:
 $(H_\alpha) \lambda_\alpha =$ $(H_\beta) \lambda_\beta =$ $(H_\gamma) \lambda_\gamma =$ $(H_\delta) \lambda_\delta =$
- Подготовьте таблицу

№		Вычисленные значения λ	Измеренные значения λ	Вычисленные значения R	$R_{\text{ср}} \pm \Delta R$
1	H_α	$\lambda_\alpha=656,1$ нм			
2	H_β	$\lambda_\beta=486$ нм			
3	H_γ	$\lambda_\gamma=433,9$ нм			
4	H_δ	$\lambda_\delta=410,1$ нм			
среднее значение					

- С помощью преподавателя или лаборанта подготовьте экспериментальную установку к работе.
- Измерьте длины волн водородных линий H_α , H_β , H_γ , H_δ , и занесите в таблицу.
- Для каждой из наблюдаемых линий водорода вычислите значение постоянной Ридберга, определите ее среднее значение по всем измерениям и оцените погрешность измерения.
- Рассчитайте теоретическое значение постоянной Ридберга по формуле:

$$R = \frac{m_e e^4}{8ch^3 \epsilon_0^2}.$$

Сравните результаты опытов с теоретическим и табличным значением R .

Контрольные вопросы

- Объясните устройство и принцип действия монохроматора МУМ.
- Объясните устройство трубок Гейслера. Почему нельзя менять трубки Гейслера при включенном высоковольтном генераторе.
- Запишите выражение для обобщенной формулы Бальмера.
- Чему равно значение числа m для серии Бальмера? Какие еще серии в спектре атома водорода вы знаете?
- Почему модель атома Резерфорда неустойчива?
- Сформулируйте постулаты Бора.
- Выведите формулу для радиусов стационарных орбит электрона в атоме водорода.
- Выведите формулу Бальмера.
- Изобразите на рисунке образование различных серий атома водорода. При каких переходах образуются те или другие серии.

Лабораторная работа № 38

Измерение интенсивности космического излучения

Цель работы: измерить интенсивность космического излучения.

Теоретическое введение

Вокруг нас всегда существует небольшая интенсивность радиационного излучения. Это излучение, называется радиационным фоном, который обусловлен действием космического излучения (галактического и солнечного) и небольшим количеством радиоактивных примесей в материалах, из которых изготовлены окружающие предметы, стены и т. д.

Измерения интенсивности космического излучения по высоте атмосферы показали, что его интенсивность быстро растет с высотой: например, на высоте 4,8 км – в четыре раза больше, чем на поверхности Земли, а на высоте 8,4 км – в 10 раз. Было обнаружено, что на высоте ~20 км интенсивность космического излучения достигает максимума, затем уменьшается и с высоты $h=50$ км остается практически постоянной, т. к. обусловлена только первичным космическим излучением.

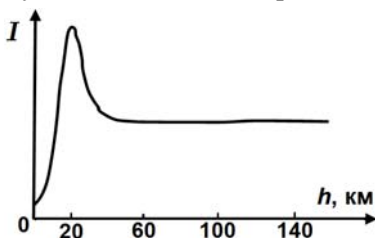


Рис. 1. Зависимость интенсивности I космического излучения от высоты над поверхностью Земли.

Итак, различают первичное и вторичное космические излучения. Излучение, приходящее непосредственно из космоса (галактическое и солнечное), называют первичным космическим излучением. Первичное излучение представляет собой поток элементарных частиц высоких энергий, причем более 90% из них составляют протоны с энергией $10^9 \div 10^{13}$ эВ. В первичный состав космических лучей входят также α -частицы (~7%), небольшая часть ядер более тяжелых элементов, имеющих порядковый номер $Z > 20$, нестабильные нейтроны и мезоны, а также электроны, антипротоны и позитроны (менее 1%).

Вторичное космическое излучение – это продукты взаимодействия в атмосфере Земли первичного излучения с атомными ядрами воздуха. Вторгаясь в атмосферу Земли, первичные космические лучи разрушают ядра наиболее распространенных в атмосфере элементов – азота и кислорода – и порождают каскадный процесс, в котором участвуют все известные в настоящее время элементарные частицы. Ниже 20 км ($h < 20$ км) космическое излучение полностью является вторичным. Далее с по-

нижением высоты его интенсивность резко уменьшается, так как вторичные частицы по мере продвижения к поверхности Земли теряют свою энергию и поглощаются в воздухе.

В составе вторичного космического излучения можно выделить два компонента: мягкий (сильно поглощается свинцом) и жесткий (обладает большой проникающей способностью).

Наличие мягкого компонента в составе вторичного космического излучения объясняется следующим образом. В космическом излучении всегда есть γ -кванты с энергией $E > 2m_e c^2$ (m_e – масса электрона), которые в поле атомных ядер превращаются в электронно-позитронные пары. Образовавшиеся электроны и позитроны, тормозясь, в свою очередь, создают γ -кванты, энергии которых еще достаточно для образования новых электронно-позитронных пар и т. д. до тех пор, пока энергия γ -квантов не будет меньше $E > 2m_e c^2$. Описанный процесс, называется электронно-позитронно-фотонным ливнем. Первичные частицы, приводящие к образованию этих ливней, обладают огромными энергиями, а ливневые частицы (электроны и позитроны) имеют малую энергию и не проходят через большие толщи вещества.

Жесткий компонент вторичного космического излучения состоит в основном из нестабильных элементарных частиц со временем жизни $\tau \sim 2,2 \cdot 10^{-6}$ с – мюонов массой $206,8 \cdot m_e$. Они образуются вследствие распада более тяжелых заряженных частиц (π - и K -мезонов), возникающих при неупругих соударениях частиц первичного излучения с ядрами атомов в верхних слоях атмосферы. Жесткий компонент вторичного излучения обладает большой проникающей способностью.

Описание установки и метода измерений

Для измерения интенсивности излучения применяются газовые счетчики. Первый газовый счетчик был сконструирован в 1908 г. в Кавендишской лаборатории под руководством Резерфорда.

Газоразрядный счетчик ТС-5 состоит из полого металлического цилиндра, по оси которого натянута укрепленная на изоляторах нить. Цилиндр заполняется разреженным газом, например, аргоном. Между нитью, которая служит положительным электродом (анодом), и стенками трубки (катодом) батарея элементов (U) создает разность потенциалов.

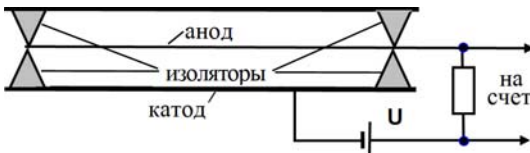


Рис. 2

Порядок выполнения работы

1. Включить установку в сеть.
2. Провести счет импульсов N_i^1 за промежутки времени $t = 60$ с.
3. Провести счет ещё 9 раз. Данные занести в таблицу.
4. Вычислить скорость счета импульсов в каждом измерении

$$N_i = N_i^1 / 60 \text{ имп/с.}$$
5. Определить среднюю скорость счета \bar{N} за всё время измерений

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad N_i - \text{ скорость счета в } i\text{-ом измерении, } n - \text{ число измерений.}$$
6. Вычислить и занести в таблицу все значения $\Delta N_i = \bar{N} - N_i$.

№ опыта	N_i^1 , имп	N_i , имп/с	\bar{N} , имп/с	ΔN_i имп/с	$\Delta \bar{N}$ имп/с	$\bar{N} \pm \Delta \bar{N}$ имп/с
1						
2						
3						
⋮	⋮	⋮		⋮		
10						

7. Определить среднюю флуктуацию фона $\Delta \bar{N}$ по формуле:

$$\Delta \bar{N} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}.$$

8. Построить график зависимости скорости счета от номера измерения.
9. Нанести на график также пунктирные линии, соответствующие \bar{N} , $\bar{N} - \Delta \bar{N}$ и $\bar{N} + \Delta \bar{N}$.
10. Сделайте оценку числа частиц, пронизывающих ваше тело за одну секунду. Размеры трубки СТС-5 счетчика Гейгера 10×76 мм.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель работы.
2. Объясните устройство и принцип работы счетчика Гейгера?
3. Какова природа и состав космических лучей?
4. Что такое радиация, и каких видов она бывает?
5. Что такое естественный радиационный фон и чем он обусловлен?
6. Расскажите порядок выполнения работы.
7. Сделайте анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 39

Изучение зависимости сопротивления полупроводников от температуры

Цель работы: Провести эксперименты по определению сопротивления полупроводников при различных температурах и вычислить ширину запрещенной зоны.

Теоретическое введение

Химически чистые полупроводники называются *собственными полупроводниками*, а их проводимость называется *собственной проводимостью*. При абсолютном нуле и отсутствии других внешних факторов собственные полупроводники ведут себя как диэлектрики. С ростом температуры электроны, находящиеся на верхних уровнях валентной зоны, могут переходить на нижние уровни зоны проводимости. Расчет показывает, что удельное сопротивление ρ собственных полупроводников определяется выражением:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (1)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны.

Опыт показывает, что ρ_0 практически не зависит от температуры, следовательно, удельное сопротивление полупроводников с ростом температуры падает. У металлов наблюдается обратная зависимость. С ростом температуры сопротивление металлов растет.

Сопротивление проводников определяется формулой $R = \rho l/S$, где l и S – длина и площадь поперечного сечения проводника соответственно, поэтому помножив обе части соотношения (1) на l/S , получим:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right). \quad (2)$$

Если в качестве независимой переменной взять $x = 1/T$, то график (2) будет иметь вид экспоненциальной зависимости:

$$R/R_0 = \exp(a \cdot x), \quad (3)$$

где $a = \Delta E/2k$.

При обработке экспериментальных результатов более удобно выбрать другую систему координат. Прологарифмируем выражение (3):

$$\ln(R/R_0) = a \cdot x.$$

Если положить $y = \ln(R/R_0)$, тогда

$$y = a \cdot x. \quad (4)$$

Это уравнение прямой линии, проходящей через начало координат.

Зависимость электрического сопротивления полупроводников от температуры используется для создания большого класса приборов – термосопротивлений или термисторов. Они используются для точного измерения температур. Такие приборы позволяют дистанционно измерять температуру и организовать автоматическое регулирование или поддержание температуры.

Вывод расчетной формулы

Температура полупроводника в настоящей работе изменяется в пределах от 30°C до 100°C. Если известны сопротивления полупроводника при температурах T_1 и T_2 , то, используя (2) можно записать:

$$R_1 = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT_1}\right); \quad R_2 = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT_2}\right). \quad (5)$$

Разделив первое уравнение на второе, и прологарифмировав, получим:

$$\ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right).$$

Откуда энергия ΔE в джоулях:
$$\Delta E = 2k \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} \text{ Дж.} \quad (6)$$

Эта энергия в джоулях имеет очень малое значение. В атомной физике энергия часто измеряется в более удобных единицах – электронвольтах (эВ).

1 эВ – это энергия, которую получает электрон, при прохождении электрического поля с разностью потенциалов 1 В.

Для того чтобы энергию ΔE получить в электронвольтах (эВ), необходимо разделить выражение (6) на энергию одного электронвольта, выраженную в джоулях:

$$\Delta E = \frac{2k}{e} \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} \text{ эВ.} \quad (7)$$

Выразим R_0 через R_1 из формулы (5), подставив значение сопротивления полупроводника при 303 К или 30°C:

$$R_0 = R_1 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT_1}\right). \quad (8)$$

Зная сопротивление R_0 можно вычислить теоретическое значение сопротивления полупроводника при любой температуре по формуле (2).

Экспериментальное значение сопротивления полупроводника измеряется с помощью лабораторной установки. Блок-схема установки представлена на рисунке 1.

Описание установки

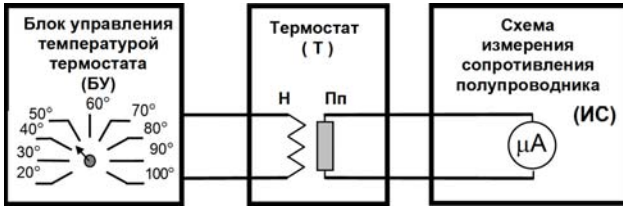


рис. 1

Изменение температуры полупроводника (Пп) осуществляется в термостате (Т). Температура термостата изменяется и поддерживается блоком управления (БУ). Измерение сопротивления осуществляется схемой в блоке (ИС). Значение сопротивления отсчитывается непосредственно по шкале измерительного прибора – омметра. Предел шкалы 100 Ом.

Порядок выполнения работы

1. При подготовке к работе подготовить таблицу

№	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$R_{exp}, \text{Ом}$	$x = 1/T$	$R_{theor}, \text{Ом}$	$y = \ln(R_{exp}/R_0)$
1	30	303	$R_{303} =$	$3,3 \cdot 10^{-3}$		
2	40	313	$R_{313} =$	$3,195 \cdot 10^{-3}$		
3	50	323	$R_{323} =$	$3,096 \cdot 10^{-3}$		
4	60	333	$R_{333} =$	$3,003 \cdot 10^{-3}$		
5	70	343	$R_{343} =$	$2,915 \cdot 10^{-3}$		
6	80	353	$R_{353} =$	$2,833 \cdot 10^{-3}$		
7	90	363	$R_{363} =$	$2,755 \cdot 10^{-3}$		
8	100	373	$R_{373} =$	$2,681 \cdot 10^{-3}$		

- Установить переключатель температуры в положение «20°C».
- Перевести тумблер «Сеть» в верхнее положение.
- Перевести переключатель температуры в положение «30°C». При этом должна загореться лампочка, характеризующая состояние термостата. При включенной лампочке нагреватель (Н) в термостате включен. При достижении температуры 30°C нагреватель выключиться и лампочка погаснет. Из-за тепловой инерционности нагревателя и датчика температура термостата устанавливается не сразу. Необходимо подождать пока лампочка термостата не «мигнет» примерно 10 раз. Показания омметра занести в таблицу. Предел шкалы омметра 100 Ом. При включении и выключении лампочки показания омметра изменяются примерно на 2 деления. В таблицу всегда заносить средние значения.
- Перевести переключатель температуры на максимальную в работе температур 100°C. Сопротивление полупроводника начнет уменьшаться и стрелка прибора будет отклоняться в сторону меньших зна-

чений. При достижении температуры 100°C лампочка начнет «мигать» после 3 миганий записать среднее значение сопротивления полупроводника в таблицу и сразу же, чтобы не перегреть прибор перевести переключатель температуры в положение « 90°C ».

6. Лампочка вначале погаснет, т. к. термостат охлаждается и при достижении температуры 90°C вновь включиться. После 3 миганий лампочки занести в таблицу показания омметра.
7. Последовательно уменьшая значения температуры через 10°C до 40°C , кроме 30°C , измерить и записать значения сопротивлений при всех температурах в таблицу (при 30°C они у нас уже есть).
8. Вычислить $\ln(R_{303}/R_{373})$.
9. Вычислить ширину запрещенной зоны ΔE в джоулях по формуле (6). Значение коэффициента $2kT_1T_2/(T_2 - T_1)$ в формуле (6) ориентировочно равно $4,5 \cdot 10^{-20}$. Вычислить точно!
10. Вычислить ширину запрещенной зоны в электронвольтах по формуле (7). Проверить, что $\frac{2k}{e} \cdot \frac{T_1T_2}{T_2 - T_1} = 0,278$, здесь $T_1=303\text{K}$, $T_2=373\text{K}$.
11. Вычислить $a = \Delta E/2k$ (ΔE взять в джоулях). Коэффициент a имеет значение порядка $3 \cdot 10^3$. Рассчитать точно!
12. Вычислить R_0 по формуле (8).
13. Вычислить теоретические значения R_{theor} при $30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100^{\circ}\text{C}$ по формуле $R_{theor} = R_0 \exp(\Delta E/2kT)$.

Например $R_{40} = R_0 \exp(a/313)$. Все R_{theor} занести в таблицу.

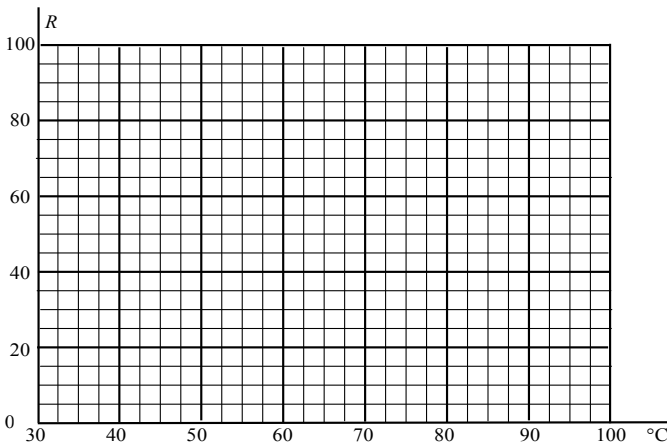


Рис. 2.

14. Построить графики экспериментальных и теоретических значений сопротивления полупроводника. Заготовка графика приведена на рис. 2.
15. Вычислить значения $y = \ln(R_{\text{exp}}/R_0)$ и занести в таблицу.
16. Построить график $y = a \cdot x$. Заготовка графика приведена на рис 3.
17. Проанализируйте полученные результаты.

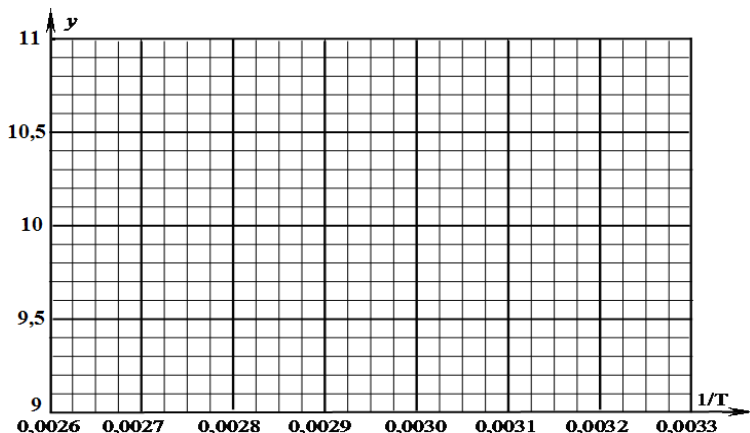


Рис. 3.

Контрольные вопросы

1. На какие группы делятся вещества по их электропроводности?
2. Нарисуйте изображение кристаллической решетки кремния на плоскости.
3. Как осуществляется притяжение между положительными ионами кристаллической решетки кремния? Положительные заряды должны отталкиваться.
4. Какие значения энергии могут принимать электроны в кристаллах?
5. Как называются зоны, по которым распределяются электроны в кристалле?
6. Объясните с точки зрения зонной теории природу проводимости проводников, полупроводников, диэлектриков.
6. Какие полупроводники называются собственными? По какому закону изменяется удельная электропроводность собственного полупроводника?
7. В каких координатах предлагается построить зависимость проводимости полупроводников от температуры? Почему выбраны такие необычные координаты?
8. Выведите расчетную формулу?
9. Объясните порядок выполнения работы.
10. Проанализируйте полученные результаты.

Лабораторная работа № 40

Эффект Холла

Цель работы: Изучить взаимодействие движущихся зарядов с магнитным полем; ознакомиться с методикой измерения индукции магнитного поля датчиком Холла, измерить постоянную Холла предложенного образца. Определить концентрацию носителей заряда.

Краткая теория

Американский физик Эдвин Герберт Холл (1855-1938) в 1879 году открыл одно из гальваномагнитных явлений – возникновение в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, электрического поля, направленного перпендикулярно к направлению тока и магнитного поля. Этот эффект назван по имени его открывателя – *эффектом Холла*.

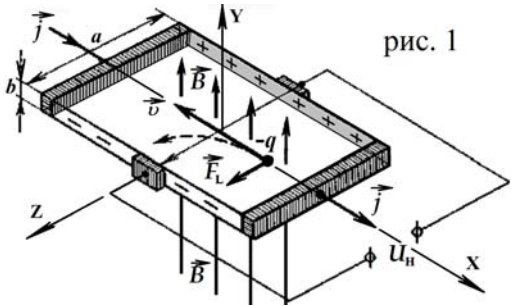


рис. 1

Поместим образец в виде прямоугольного параллелепипеда из проводящего материала сечением $S_{\perp} = a \cdot b$ в магнитное поле, так как показано на рис. 1. Направление тока совпадает с положительным направлением оси X , магнитное поле направлено вдоль оси Y . Если ток обусловлен движением положительных зарядов, тогда направление их скорости будет совпадать с направлением оси X , если ток будет обусловлен движением отрицательных зарядов, то против оси X .

При данном направлении тока, независимо от знака зарядов, они будут отклоняться влево, т. е. по оси Z . Левая боковая грань зарядится положительно при положительном знаке носителей и отрицательно при отрицательном. В результате такого перераспределения зарядов в образце возникнет дополнительное электрическое поле \vec{E}_B . Перераспределение зарядов будет происходить до тех пор, пока результирующая сила, действующая на движущийся заряд, не будет равна нулю т. е.

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{мар} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0. \quad (1)$$

Спроектировав это уравнение на ось Z , найдем $E_B = vB$. Если считать поле однородным, то разность потенциалов между боковыми гранями будет равна $U_H = E_B \cdot b$.

Последнее выражение можно преобразовать к виду:

$$U_H = v \cdot B \cdot b = v \cdot B \cdot \frac{S_{\perp}}{a}. \quad (2)$$

И окончательно, считая, что $v = \frac{j}{q \cdot n}$ и $I = j \cdot S_{\perp}$, получим

$$U_H = \frac{j \cdot B \cdot S_{\perp}}{n \cdot q \cdot a} = \frac{1}{n \cdot q} \cdot \frac{j \cdot S_{\perp} \cdot B}{a} = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{a}. \quad (3)$$

Т. е. холловская разность потенциалов пропорциональна величине индукции магнитного поля и силе тока через образец и обратно пропорциональна толщине пластинки.

Коэффициент $R_H = \frac{1}{n \cdot q} = \frac{U_H \cdot a}{I \cdot B}$ носит название *постоянной Холла*.

Постоянная Холла зависит от концентрации n и знака носителей заряда. Она тем больше, чем меньше в веществе концентрация свободных носителей заряда, поэтому в полупроводниках холловская разность потенциалов имеет существенно большее значение, чем в металлах при тех же значениях тока, магнитного поля и толщины образца.

Эффект Холла получил широкое применение в современной науке и технике. Он используется для исследования природы носителей заряда в металлах и полупроводниках, измерения индукции магнитных полей. В аналоговых вычислительных машинах он применяется для моделирования функции умножения. Датчики Холла используются в магнитофонах и телекамерах для стабилизации скорости вращения электродвигателей. Раньше для этих целей применяли тяжелые маховики с большими моментами инерции.

Экспериментальная установка

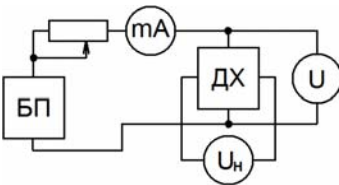


Рис. 2

Блок-схема установки представлена на рис. 2. Образец из германия (ДХ – датчик Холла) подключен к блоку питания (БП) и измерительной цепи. Ток, протекающий через образец, измеряется миллиамперметром (mA). Холловская разность потенциалов U_H – прибором U_H . Напряжение

на датчике Холла измеряется вольтметром U .

Магнитное поле создается постоянным магнитом. Исследуемый образец оформлен в виде датчика, который помещается в зазор магнита.

Предостережение !!! Постоянный магнит создает большую величину магнитной индукции вне зазора, т. е. в окружающем пространстве. Это поле не влияет на здоровье, но может намагнитить механизм механических часов и нарушить их нормальную работу. Во время работы с магнитом часы рекомендуется снять. Запись на магнит-

ных дисках и карточках с магнитной полосой может быть повреждена магнитным полем. Работа кардиостимуляторов также может быть нарушена !!!

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу.

№	I	U_H	U	R_H	$n = \frac{1}{R_H \cdot q}$	$R = \frac{U}{I}$	$\rho = \frac{R \cdot S_{\perp}}{l}$
1							
2							
3							
4							
средние значения							

- Включить прибор в сеть.
- Переключатель Π_1 установить в положение « I_1 ».
- Переключатель Π_2 в положение « I ». Занести значение тока I_1 в таблицу. Предел прибора при измерении тока составляет 30 мА.
- Переключатель Π_2 перевести в положение U_H . В этом положении верхний предел измерительного прибора оставляет 6 мВ.
- Перевести переключатель Π_2 в положение « U ». В этом положении верхний предел измерительного прибора оставляет 0,9 В. Значение напряжения на образце U занести в таблицу.
- Переключатель Π_1 поочередно переводить в положения « I_2 », « I_3 », « I_4 » и проделать указания пунктов 4 и 6.
- Вычислить значения R_H для каждого опыта. Индукция магнитного поля в зазоре $B = 0,05$ Тл. Размеры датчика Холла следующие: толщина $a = 2$ мм, ширина $b = 5$ мм, длина $l = 20$ мм.
- Найти среднее значение R_H .
- Вычислить концентрацию носителей заряда в датчике. Основными носителями тока в используемом датчике являются электроны.
- Вычислить сопротивление R датчика Холла.
- Найти удельное сопротивление ρ датчика Холла из формулы $R = \rho l / S$.
- Сравнить с табличным значением удельного сопротивления меди при комнатной температуре ($\rho = 17 \cdot 10^{-9}$ Ом·м).

Контрольные вопросы

- Записать выражение для силы Лоренца.
- Объяснить механизм возникновения холловской разности потенциалов U_H . От каких факторов она зависит?
- Как определяется направление силы действующей на заряд, движущийся в магнитном поле?

4. Дать определение силы тока, плотности тока.
5. В каких единицах в системе СИ измеряется индукция магнитного поля, холловская постоянная?
6. Как находится средняя скорость носителей заряда?
7. Нарисовать блок-схему установки и рассказать порядок выполнения работы.
8. Какие физические величины определялись в данной работе?
9. Где применяются датчики Холла?

Лабораторная работа № 41

Исследование вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Цель работы: Изучить принцип работы полупроводникового диода. Исследовать зависимость тока через полупроводниковый диод от приложенного напряжения.

Краткое теоретическое введение

Область на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности называется электронно-дырочным или *p-n*-переходом.

Поскольку между областями *p-n*-перехода устанавливается некоторая разность потенциалов, то возникает вопрос: нельзя ли использовать этот переход как источник питания? Если включить такой предполагаемый источник питания в цепь, то он не создаст в цепи никакого тока. В противном случае такой источник противоречил бы второму началу термодинамики. Он был бы эквивалентен вечному двигателю второго рода.

Однако через переход, находящийся в равновесном состоянии, протекают токи. Какие же это токи?

Потенциальный барьер создает различные условия для перехода через него электронов и дырок. Электрону, чтобы проникнуть из *n*-слоя в *p*-слой, необходимо «взять» барьер высотой $\Delta E = q\Delta\varphi_k$. Электрическое поле в барьере потенциально, поэтому частицы в этом поле должны подчиняться распределению Больцмана

$$n_p = n_n \exp(-\Delta E/kT) = n_n \exp(-e\Delta\varphi_k/kT), \quad (1)$$

где n_n – концентрация электронов в *n*-области вдали от перехода, n_p – концентрация электронов на энергетической высоте $e\Delta\varphi_k$, $\Delta\varphi_k$ – контактная разность потенциалов.

Соотношение, подобное (1), для дырок имеет вид:

$$p_n = p_p \exp(-e\Delta\varphi_k/kT). \quad (2)$$

Носители, преодолевающие потенциальный барьер, определяемые по уравнениям (1) и (2), создают так называемый диффузионный ток. Этот ток, очевидно, пропорционален числу носителей, преодолевших барьер

$$j_{pD} \sim p_p \exp(-e\Delta\varphi_k/kT). \quad (3)$$

На рис. 1 эти токи обозначены стрелками поперек барьера.

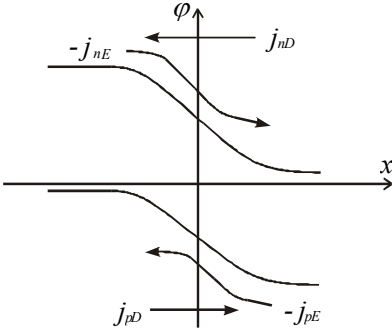


рис. 1

Поскольку в равновесном состоянии ток через переход равен нулю, то навстречу диффузионному должен течь еще какой-то ток. Что это за ток?

Электроны, родившиеся в p -области вблизи перехода или в самом переходе, попадают в его поле и как с «горки» скатываются в n -область. Этот ток мы обозначим через j_{nE} и будем называть электронным током проводимости. Из n -области в p -область будут скатываться дырки и ток, создаваемый этими

дырками, называют дырочным током проводимости и обозначают j_{pE} . На рис. 1 эти токи также обозначены стрелками.

Таким образом, через переход, находящийся в равновесном состоянии, будут протекать четыре тока, алгебраическая сумма которых равна нулю

$$j_{pD} - j_{pE} - j_{nE} + j_{nD} = 0, \quad \text{или} \quad j_{pD} + j_{nD} = j_{pE} + j_{nE}.$$

Обозначив суммарный диффузионный ток в условиях равновесия через

$j_D = j_{nD} + j_{pD}$, а суммарный ток проводимости через $j_E = j_{nE} + j_{pE}$, получим окончательно, что в условиях равновесия ток проводимости через переход точно равен току диффузии, т. е. $j_D = j_E$.

Напомним, что положительное направление тока совпадает с направлением движения положительных зарядов и противоположно направлению движения отрицательных зарядов.

Подключим p - n -переход к источнику напряжения. Это напряжение нарушит равновесное состояние в системе и вызовет протекание тока. Пусть внешнее напряжение понижает потенциальный барьер на величину ΔU , тогда ток через переход увеличится и будет пропорционален

$$J_{ID} \sim \exp[e(\Delta U - \Delta\varphi_k)/kT]. \quad (4)$$

Отношение диффузионного тока через переход, находящийся под напряжением к току через переход в условиях равновесия равно:

$$\frac{J_{ID}}{J_D} = \frac{\exp[e(\Delta U - \Delta\varphi_k)/kT]}{\exp[-e\Delta\varphi_k/kT]} = \exp(e\Delta U/kT). \quad (5)$$

Ток проводимости J_0 через переход, пока ΔU не очень велико, практически не меняется, т. е. его можно считать равным току проводимости через переход в условиях равновесия. В условиях равновесия он был равен диффузионному току. Не изменяющийся ток проводимости через диод называют током насыщения

$$J_0 = J_D. \quad (6)$$

Общий ток через переход равен $J = J_{ID} - J_0$, или с учетом (5) и (6)

$$J = J_0 [\exp(e\Delta U/kT) - 1]. \quad (7)$$

Если к переходу прикладывать напряжение ΔU , повышающее потенциальный барьер, то ток изменит направление и, уменьшаясь, достигнет постоянного значения J_0 . График зависимости плотности тока через переход от приложенного напряжения представлен на рис. 2. Этот график носит название вольт-амперной характеристики (ВАХ) перехода. Мы видим, что вольт-амперная характеристика перехода нелинейная; в отличие от обычного сопротивления, подчиняющегося закону Ома.

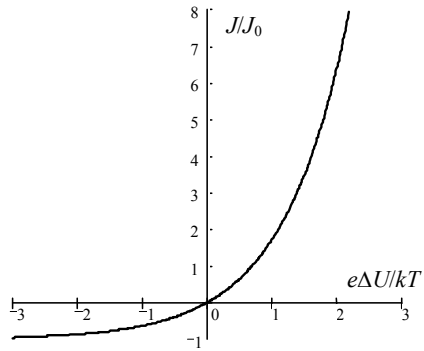


Рис. 2

p-n-переход является основным элементом полупроводниковых диодов. Область применения диодов в электронике чрезвычайно велика. В справочнике по полупроводниковым диодам содержатся данные на более чем триста наименований различных приборов.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу.

Таблица 1

Прямой ток	U (В)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
	I (мА)								
	U (В)	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	
	I (мА)								
Обратный ток	U (В)	0	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,1	-0,3	-0,5
	I (мкА)								

2. Схема установки приведена на рис 3.

3. Перевести тумблер в положение «Прямой ток». Ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение. При нажатой кнопке «ВКЛ» изменяя напряжение от 0 до 0,7 В через 0,05 В занести значения тока в таблицу. Пределы измерения шкалы вольтметра 0÷1 В. Пределы измерения шкалы миллиамперметра 0÷10 мА.

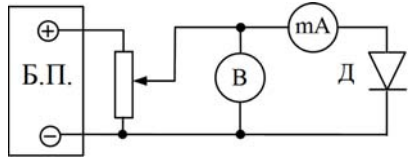


рис. 3

4. Перевести тумблер в положение «Обратный ток». Отключить арретир, переведя тумблер в положение «ВЫКЛ». Удерживая кнопку «ВКЛ» в нажатом состоянии и изменяя напряжение от 0 до -0,5 В занести показания микроамперметра в табл. 1. Пределы измерения шкалы микроамперметра при нажатой кнопке 0÷2 мкА. По окончании измерений включить арретир, переведя тумблер в положение «ВКЛ».
5. Построить график зависимости $I = f(U)$. Примерная координатная сетка приведена на рис. 4.
6. Полученный график сравнить с графиком на рис. 2.
Сделать выводы.

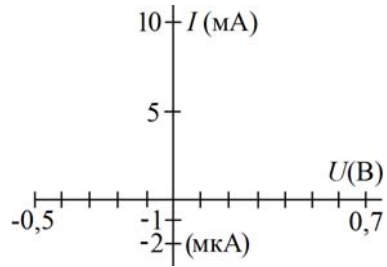


рис. 4

Контрольные вопросы

1. Объясните явления, в области p - n -перехода приводящие к возникновению потенциального барьера для основных носителей заряда.
2. Почему полупроводниковый диод пропускает ток в одном направлении и почти не пропускает в другом?
3. Что произойдет с диодом, если обратное напряжение неограниченно увеличивать?
4. Нарисуйте схему установки и объясните порядок выполнения работы.
5. Проанализируйте экспериментальные данные.
6. Где применяются полупроводниковые диоды?
7. Нарисуйте схему простейшего выпрямителя переменного тока.
8. Что такое диодный мост?

Лабораторная работа № 42

Исследование статических характеристик биполярного транзистора

Цель работы: Изучить принцип работы биполярного транзистора, исследовать зависимости характеристик транзистора от приложенных напряжений.

Устройство транзистора

Устройство биполярного транзистора схематически изображено на рис. 1. Прибор состоит из трех областей полупроводника с различным типом проводимости. В зависимости от порядка чередования областей различают транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$.

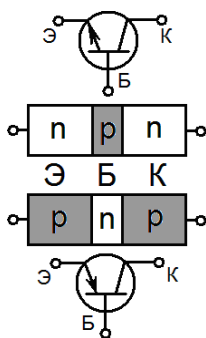


рис. 1

В транзисторах типа $n-p-n$ рабочими носителями тока являются электроны, а в транзисторах типа $p-n-p$ — дырки. Физические принципы этих транзисторов не отличаются и, чтобы не дублировать всех рассуждений, мы рассмотрим работу транзистора типа $p-n-p$.

Транзистор является прибором с двумя $p-n$ -переходами. Переходы возникают на границе тех областей, из которых состоит транзистор. Для того чтобы привести прибор в рабочее состояние, на переходы через контакты необходимо подать соответствующие напряжения. На один из переходов подается прямое напряжение смещения, т. е. напряжение, которое понижает потенциальный барьер. Этот переход называется эмиттерным, а соответствующая крайняя область — *эмиттером*.

На другой переход, называемый коллекторным, подано обратное напряжение, т. е. этот переход в рабочем состоянии заперт. Крайняя область, примыкающая к коллекторному переходу, называется *коллектором*. Средняя область называется *базой*.

Необходимые напряжения на переходах создаются путем включения транзистора в электрическую цепь, содержащую источник питания. Существует много разновидностей таких цепей, но мы не будем на них останавливаться, и при анализе работы транзистора будем предполагать, что напряжения смещения на переходы уже поданы.

Принцип работы транзистора

Основной секрет работы транзистора заключен в устройстве его базы. Ширина области базы хорошо работающего транзистора должна быть много меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда в базе:

$$W \ll L_p, \quad (1)$$

где W – ширина базы, L_p – диффузионная длина неосновных носителей в базе. Напомним, что мы анализируем работу транзистора типа $p-n-p$.

Для уяснения работы транзистора представим, что база широкая, т. е. $W \gg L_p$. Эта структура представляет собой два диода, один из которых включен в прямом, а другой – в обратном направлении. Переходы не взаимодействуют между собой и никакими новыми свойствами такая структура не обладает.

В реальной транзисторной структуре с тонкой базой эмиттерный и коллекторный переходы нельзя рассматривать как два изолированных перехода. Носителями, определяющими работу $p-n-p$ транзистора, являются дырки. Т. к. эмиттерный переход в рабочем состоянии открыт, то из эмиттера в базу будет впрыскиваться большое количество дырок. На первый взгляд может показаться, что этот ток вытечет через базовый контакт, но поскольку база узкая, то дырки успевают продиффундировать через всю базовую область и достичь коллекторного перехода. Попав в коллекторное поле, которое для дырок является ускоряющим, дырки попадут в область коллектора и выйдут через коллекторный электрод.

Для компенсации положительного заряда дырок, впрыснутого из эмиттера в базу, через базовый контакт начнут поступать отрицательные электроны. Дырки и электроны, находящиеся в базе, начнут «искать» друг друга, чтобы рекомбинировать, но т. к. время жизни носителей в базе значительно больше их пребывания в ней, то лишь небольшая часть найдет себе пару и прорекомбинирует. Ток коллектора связан с током эмиттера соотношением:

$$I_k = \alpha I_e + I_0, \quad (2)$$

где α – коэффициент переноса дырок в базе, I_0 – обратный ток коллекторного перехода, обусловленный его проводимостью в запертом состоянии.

Как показывает расчет, коэффициент переноса определяется простым выражением:

$$\alpha = 1 - \frac{W^2}{2L_p^2}, \quad (3)$$

т. е. чем меньше ширина базы, тем большая доля дырок доходит до коллектора. В реальных транзисторах значение W/L_p лежит в пределах от 0,5 до 0,05, следовательно, коэффициент переноса изменяется от 0,9 до 0,999.

Коэффициент усиления биполярного транзистора

Найдем связь между токами, протекающими через электроды транзистора. Ток, поступающий в базу из эмиттера, выходит из базового и коллекторного электрода, т. е.

$$I_3 = I_k + I_6. \quad (4)$$

Коллекторный ток складывается из части тока эмиттера и обратного тока запертого коллекторного перехода (см. формулу 2). Однако в современных транзисторах величина обратного тока коллекторного перехода чрезвычайно мала и ею во многих случаях можно пренебречь, поэтому

$$I_k \approx \alpha I_3 \quad (5)$$

Введем еще одну величину, характеризующую усилительные свойства транзистора. Коэффициентом усиления транзистора по току называют величину β , которую определяют следующим образом:

$$\beta = I_3 / I_6. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (4), (5), (6) относительно β , получим

$$\beta = 1 / (1 - \alpha). \quad (7)$$

Если $\alpha = 0,9$, то $\beta > 10$; при $\alpha = 0,999$ коэффициент усиления по току становится равным 1000. Современные транзисторы могут иметь усиление порядка десяти тысяч. Т. к. у современных транзисторов $\alpha \cong 1$, то, не допуская большой погрешности, можно считать:

$$\beta = I_k / I_6. \quad (8)$$

По этой формуле мы будем вычислять коэффициент усиления транзистора в схеме с общей базой.

Таким образом, если подавать на базу транзистора ток, который нужно усилить, то в коллекторной цепи он будет увеличенным в β раз.

Транзисторы используются не только для усиления, но и генерирования и преобразования электрических сигналов. В настоящее время разработано большое количество совершенных транзисторов для самых различных применений.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется на установке, схема которой приведена на рис. 2.

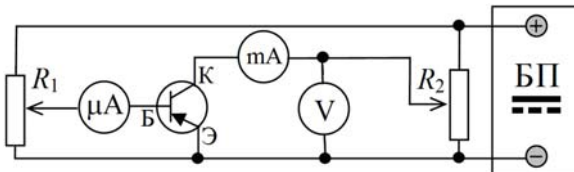


рис. 2

Опыт 1. Снятие выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

1. Подготовить таблицу.

Таблица 1

$I_{\bar{o}} = 20$ мкА	U_{κ}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3
	I_{κ}									
$I_{\bar{o}} = 30$ мкА	U_{κ}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3
	I_{κ}									
$I_{\bar{o}} = 40$ мкА	U_{κ}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3
	I_{κ}									

- Установить регулятором тока базы 20 мкА.
- Перевести тумблер источника напряжения в положение «0,5 В».
- Изменяя напряжение на коллекторе линейным резистором от 0 В до 0,5 В через 0,1 В занести значения тока коллектора в таблицу 1.
- Перевести тумблер источника напряжения в положение «5 В» и, устанавливая значения напряжения коллектора 1 В, 2 В, 3 В, заполнить строку « I_{κ} » до конца.
- Устанавливая последовательно токи базы 30 и 40 мкА и выполняя пункты 3, 4, 5, полностью заполнить таблицу.
- Построить графики трех выходных характеристик транзистора $I_{\kappa} = f(U_{\kappa})$. По оси абсцисс откладывать значения U_{κ} , а по оси ординат I_{κ} .

Опыт 2. Снятие характеристики управления транзистора $I_{\kappa} = f(I_{\bar{o}})$.

- Установить напряжение на коллекторе 4 В.
- Изменяя ток базы от 0 до 40 мкА снять значения тока коллектора и занести в таблицу 2.

Таблица 2

$I_{\bar{o}}$ (мкА)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
I_{κ} (мА)									

- Построить график зависимости $I_{\kappa} = f(I_{\bar{o}})$.
- Построить график зависимости коэффициента усиления по току $\beta = f(I_{\bar{o}})$.

Контрольные вопросы

- Расскажите устройство транзистора. Как называются области, из которых состоит транзистор?
- Расскажите принцип работы транзистора? Почему ширина базы транзистора должна быть очень тонкой?
- Почему носители заряда в хорошо работающем транзисторе, впрыснутые в базу не выходят в базовый вывод, а достигают коллекторного перехода и втягиваются в него?
- Как связан ток коллектора с током эмиттера?

5. Чем определяется коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общей базой?
6. Нарисуйте схему для снятия статических характеристик транзистора.
7. Расскажите о практических применениях транзисторов.
8. Каковы преимущества и недостатки транзистора по сравнению с электронными лампами?

Лабораторная работа № 43

Туннельный диод

Цель работы: изучить принцип работы туннельного диода, снять его вольтамперную характеристику, оценить значение отрицательного сопротивления.

Теоретическое введение

Квантовый туннельный эффект (ТЭ) обуславливает протекание ряда процессов в твердых телах, в частности, выход электронов с поверхности металла под действием электрического поля большой напряженности (автоэлектронная эмиссия). Примером ТЭ является переход электронов в сверхпроводниках через тонкий слой изолирующего вещества (эффект Джозефсона) и ряда других явлений. При определенных условиях возможно туннельное прохождение электронов через потенциальный барьер p - n -перехода. Это явление лежит в основе принципа работы туннельного диода (ТД).

ТД изготавливается из полупроводников (ПП) с концентрацией примесей ($10^{25} \div 10^{27} \text{ м}^{-3}$), т. е. в сотни или тысячи раз большими, чем в обычных диодах. Такие ПП называют вырожденными. В вырожденном ПП p - n -переход в десятки раз тоньше ($5 \div 15 \text{ нм}$), чем в обычных диодах, а потенциальный барьер примерно в два раза больше. В обычных ПП диодах высота потенциального барьера равна примерно половине ширины запрещенной зоны, а в ТД она несколько больше этой ширины. Вследствие малой толщины p - n -перехода напряженность поля в нем достигает 10^6 В/см .

В ТД часть явлений происходит как и в обычном диоде, однако основную роль играет ТЭ. Он заключается в том, что даже при малой энергии электронов, возможно их проникновение через потенциальный барьер. Этот эффект невозможен с точки зрения классической физики, но реален в рамках микромира. Микрообъекты в некоторых случаях ведут себя как частицы, а с другой, как волны. Эта концепция двойственности материи получила название корпускулярно-волнового дуализма, сформулированной Луи де-Бройлем.

Процессы в ТД рассматривают на энергетических диаграммах. Из за контактной разности потенциалов в p - n -переходе границы всех зон одной из областей сдвинуты относительно зон другой на высоту потенциального барьера.



рис. 1

На рис. 1 изображено возникновение туннельных токов в p - n -переходе. Внешнее напряжение отсутствует $u = 0$, потенциальный барьер для определенности принят равным 0,8 эВ, а ширина запрещенной зоны 0,6 эВ. Горизонтальными линиями в зоне проводимости и в валентной зоне показаны энергетические уровни, полностью или частично занятые электронами. В валентной зоне и зоне проводимости изображены также не заштрихованные горизонтальными линиями участки, которые соответствуют уровням энергии, не занятым электронами. В зоне проводимости ПП n -типа и в валентной зоне ПП p -типа есть занятые электронами уровни, которым соответствуют одинаковые энергии. Поэтому возможен туннельный переход электронов из n области в p (прямой ток $-i_{пр}$) и из p области в n (обратный ток $-i_{обр}$). Эти два тока одинаковы, и результирующий ток через p - n -переход равен 0.

На рис. 2 показаны явления при подаче прямого напряжения $u = 0,1$ В. Потенциальный барьер понизился на 0,1 эВ и составляет 0,7 эВ. Туннельный ток из n -области в p усилился, так как в p -области имеются в валентной зоне свободные уровни с такими же энергиями, как энергии уровней, занятых электронами в зоне проводимости n -области. А переход электронов из валентной зоны p -области в n невозможен, так как уровни, занятые электронами в p -области, совпадают в n с уровнями запрещенной зоны. Обратный туннельный ток отсутствует, и результирующий ток достигает максимума. В промежуточных случаях, например когда $u_{пр} = 0,05$ В, существует и прямой и обратный туннельные токи, но обратный ток меньше прямого. Результирующим будет прямой ток, но он меньше максимального, который достигается при $u_{пр} = 0,1$ В.



рис. 2

На рис. 3 показан p - n -переход при напряжении 0,2 В. При этом напряжении туннельный переход электронов невозможен, так как против уровней энергии, занятым электронами в n -области, находится запре-

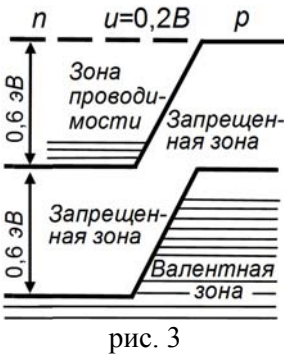


рис. 3

щенная зона. Туннельный ток равен нулю. Он отсутствует также и при ещё большем прямом напряжении. Следует помнить, что при возрастании прямого напряжения увеличивается и прямой диффузионный ток диода.

При значениях $u_{пр} < 0,2$ В диффузионный ток гораздо меньше туннельного, а при $u_{пр} > 0,2$ В диффузионный ток возрастает и достигает значений, характерных для прямого тока обычного диода.

На рис. 4 рассмотрен случай, когда обратное напряжение $u_{обр} = 0,2$ В. Высота потенциального барьера стала 1 эВ, и увеличилось число уровней, занятых электронами в p -области и число свободных в n -области. Поэтому и резко возрастает обратный ток.

На рис. 5 сплошной линией показана вольтамперная характеристика ТД. При $u = 0$ ток $I = 0$. При $u = 0,1$ В туннельный ток максимален (точка А). Дальнейшее увеличение прямого напряжения приводит к уменьшению туннельного тока и в точке Б он достигает минимума. Падающий на графике участок АБ является отрицательным сопротивлением по переменному току $R_i = \frac{du}{dI} < 0$.

При дальнейшем увеличении напряжения ток снова возрастает за счет диффузионного тока, который на рис. 5 показан штриховой линией. Обратный же ток ТД во много раз больше, чем обратный ток обычных диодов.

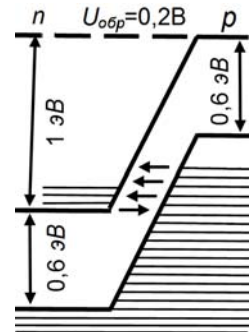


рис. 4

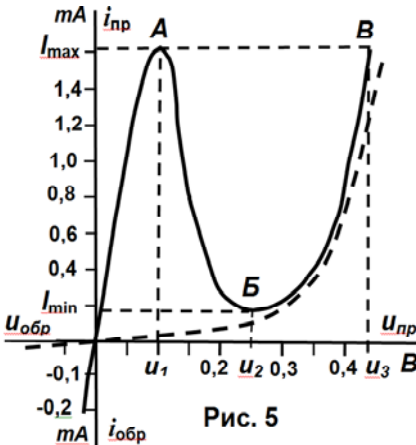


Рис. 5

Основными характеристиками ТД являются: ток максимума I_{max} , ток минимума I_{min} , напряжение максимума u_1 , напряжение минимума u_2 , наибольшее напряжение u_3 . Разность $\Delta u = u_3 - u_1$ называется напряжением переключения или напряжением скачка. Токи ТД составляют единицы миллиампер, прикладываемые напряжения — десятки доли вольта. К параметрам также относится отрицательное дифференциальное сопротивление диода $R_i = du/dI$, общая емкость диода,

время переключения (доли наносекунды).

Включая ТД в различные схемы, можно его отрицательным сопротивлением компенсировать положительное активное сопротивление, если его рабочая точка будет находиться на участке АБ, и получать режим усиления или генерации колебаний. Например, в обычном колебательном контуре за счет потерь всегда имеется затухание. Но с помощью отрицательного сопротивления ТД его можно компенсировать.

Туннельный переход электронов через потенциальный барьер происходит в очень малые промежутки времени. С его помощью можно генерировать и усиливать колебания с частотой до десятков и даже сотен гигагерц. Частотный предел работы ТД определяется не инерционностью туннельного эффекта, а емкостью p - n -перехода самого диода.

Описание установки

Схема установки представлена на рис. 6. Кнопка К служит для подключения схемы к батарее питания. С помощью потенциометра R изменяется напряжение, подаваемое на ТД ИИ103Г. Миллиамперметр mA (предел которого 2 mA) служит для измерения тока через диод, вольтметр V (с пределом 0,5 В) – для измерения напряжения на ТД.

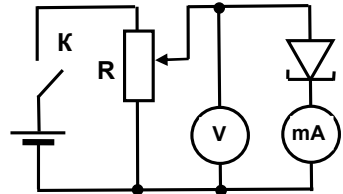


Рис. 6

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки.
2. Перевести тумблер на лицевой панели в положение «прямой ток».
3. Зависимость $I(u)$ снимается при нажатой кнопке К.
4. Плавно изменяя напряжение с помощью потенциометра R в пределах от 0 до 0,35 В при значениях, указанных в таблице, снять показания mA. Полученные значения тока занести в табл. 1.

Таблица 1. Прямое напряжение

u , mV	0	20	40	60	80	90	100	110	120	130	140	150	160	180	200	240	270	300	320	350
I , mA																				

5. Перевести тумблер на лицевой панели в положение «обратный ток».
6. Плавно изменяя напряжение с помощью потенциометра R в пределах от 0 до $-0,03$ В при значениях, указанных в табл. 2, снять показания mA и занести в табл. 2.

Таблица 2. Обратное напряжение

u , mV	0	-10	-20	-30
I , mA				

7. Построить вольтамперную характеристику туннельного диода $I(u)$. Для построения графика используйте всю страницу тетрадного листа. Чтобы на графике разместились все измеренные значения, по оси абсцисс откладывайте значения напряжения на диоде. Одна клетка соответствует 10 mV. По оси ординат – значения тока. Одна клетка соответствует 0,1 mA. Ориентировочный вид графика представлен на рис. 5.
8. По построенному графику по формуле $R_i = \Delta u / \Delta I$ рассчитать дифференциальное сопротивление «спадающего» участка кривой в окрестности точки 0,15 В.

Контрольные вопросы

1. Привести примеры явлений, в основе которых лежит туннелирование частиц.
2. Из каких ПП изготавливают ТД?
3. В чем сущность туннельного эффекта?
4. Нарисовать диаграммы зонной структуры при различных напряжениях на p - n -переходе и объяснить с их помощью работу ТД.
5. Объясните особенности вольтамперной характеристики ТД при прямом и обратном включениях?
6. Детский вопрос: как выглядит вольтамперная характеристика обычного сопротивления?
7. Что такое отрицательное дифференциальное сопротивление?
8. Сравнить принцип работы и вольтамперные характеристики обычного и туннельного полупроводниковых диодов и объяснить различия.
9. В каких схемах используются ТД?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики: механика, молекулярная физика. Том 1. – М.: Наука, 1982.
2. Савельев И. В. Курс общей физики: электричество и магнетизм, волны, оптика. Том 2. – М.: Наука, 1988.
3. Савельев И. В. Курс общей физики: квантовая оптика, атомная физика, физика твердого тела, физика атомного ядра и элементарных частиц. Том 3. – М.: Наука, 1987.
4. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2001.
5. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики: учебное пособие для втузов. – М.: Высшая школа, 1989.
6. Бахтин Н.А., Осинцев А.М. Физика. Часть 1. Механика. – Курс лекций для студентов вузов. КемТИПП, 2008. – 176 с.
7. Бахтин Н.А., Осинцев А.М. Физика. Часть 2. Электричество, магнетизм, оптика. – Курс лекций для студентов вузов. КемТИПП, 2009. – 192 с.
8. Бахтин Н.А., Осинцев А.М. Физика. Часть 3. Строение и свойства вещества. – Курс лекций для студентов вузов. КемТИПП, 2012. – 192 с.
9. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983.

Литература по физике на сайте электронной библиотеки КемТИПП:

<http://e-lib.kemtipp.ru/index.php?id=22>