

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра теории и методики профессионального образования

Составители
Т. В. Лавряшина
А. А. Мальшин

ФИЗИКА

Методические указания к лабораторным работам
для студентов 1 курса специальностей СПО
технологического профиля

Рекомендовано цикловой методической комиссией
математических и естественнонаучных дисциплин
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензент:

Ощепкова Е. А. – председатель цикловой методической комиссии математических и естественнонаучных дисциплин СПО

Лавряшина Таисия Васильевна

Мальшин Анатолий Александрович

Физика [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам для студентов 1 курса специальностей СПО технологического профиля очной формы обучения / сост. Т. В. Лавряшина, А. А. Мальшин; КузГТУ. – Электрон. издан. – Кемерово, 2019.

Приведено содержание самостоятельных и практических работ, материал, необходимый для успешного изучения дисциплины.

© КузГТУ, 2019

© Лавряшина Т. В.,
Мальшин А. А.,
составление, 2019

| | |
|---|----|
| Методические рекомендации студентам | 3 |
| Лабораторная работа № 1 Расчёт погрешностей результатов измерений | 4 |
| Лабораторная работа № 2 Определение ускорения силы тяжести | 13 |
| Лабораторная работа № 3 Исследование затухающих электромагнитных колебаний | 18 |
| Лабораторная работа № 4 Определение удельного сопротивления проводника | 24 |
| Лабораторная работа № 5 Определение сопротивления методом амперметра – вольтметра | 30 |
| Лабораторная работа № 6 Изучение температурной зависимости сопротивления металлов | 34 |
| Лабораторная работа № 7 Определение индуктивности катушки | 37 |
| Вопросы для самоподготовки | 42 |
| Лабораторная работа № 8 Определение показателя преломления стекла интерференционным методом | 43 |
| Лабораторная работа № 9 Определение параметров дифракционной решетки | 48 |
| Лабораторная работа № 11 Проверка законов внешнего фотоэффекта | 64 |
| Вопросы для самоподготовки | 70 |
| Список литературы | 72 |

Методические рекомендации студентам

В лабораторный практикум включены лабораторные работы по разделу физики «Электромагнетизм».

При выполнении лабораторного практикума студент не только получает элементарные навыки проведения эксперимента, но и учится самостоятельно анализировать физические явления, сопоставлять выводы теории и экспериментальные результаты, выделять главное, понимать роль идеализации, рассчитывать погрешности измерений.

Рекомендации студентам по организации самостоятельной работы в учебных лабораториях включают следующие положения:

1. На каждое занятие согласно графику выполнения лабораторных работ студент должен приходиться подготовленным. На самостоятельную работу студентам для подготовки к выполнению каждой лабораторной работы отводится около 4 часов.

2. Подготовка включает изучение содержания лабораторной работы, проработку теоретического материала по учебникам и учебным пособиям для самостоятельной работы, заготовку краткого конспекта отчёта предстоящей работы. Конспект отчёта содержит название и цель работы, рисунок установки, поясняющий идею метода, электрическую схему, рабочие формулы и таблицы для занесения в них измеряемых и вычисляемых величин. Конспект отчёта может быть выполнен как в рукописном, так и в электронном варианте.

3. Для выполнения работы необходимо получить допуск, объяснив суть используемого метода, устройство установки, электрическую схему, уметь определять цену деления измерительного прибора, знать последовательность измерений, уметь обрабатывать результаты измерений, оценивать погрешность, знать порядок измерений, алгоритм вычислений искомых величин и их погрешностей, а также ожидаемый характер исследуемых зависимостей.

4. Результаты эксперимента и отчёт, содержащий вывод о проделанной работе, подписываются преподавателем.

Лабораторная работа № 1

Расчёт погрешностей результатов измерений

1. Цель работы: освоить методику расчёта погрешностей прямых и косвенных измерений.

2. Приборы и принадлежности: микрометр, штангенциркуль, масштабная линейка, измеряемое тело.

3. Подготовка к работе: изучить данное методическое указание; ответить на вопросы самоподготовки 1–10.

Для выполнения данной лабораторной работы студент должен:

- знать:

а) об измерениях и их особенностях;

- уметь:

а) пользоваться микрометром и штангенциркулем;

б) определять их цену деления;

в) рассчитывать погрешности прямых и косвенных измерений.

4. Выполнение работы

4.1. Виды измерений и их погрешности

Физический эксперимент сопровождается измерениями, при которых неизбежно возникают погрешности, вызывающие отклонение полученного результата от истинного значения измеряемой величины. *Измерением* называется сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения – *эталоном*.

Различают измерения *прямые* (искомая величина определяется с помощью измерительного прибора) и *косвенные* (физическая величина вычисляется с помощью определённой формулы, в которую входят другие величины, предварительно определённые путём прямых измерений).

Погрешности подразделяют на три группы:

а) *случайные погрешности*, вызываемые многими причинами и непредсказуемо изменяющие своё значение и знак;

б) *систематические погрешности*, сохраняющие величину и знак от опыта к опыту. К ним относятся приборные или инструментальные погрешности;

в) *инструментальные (приборные) погрешности* – это такие погрешности, которые принадлежат данному средству измере-

ний, и определяются ценой деления, половиной цены деления шкалы измерительного прибора.

4.2. Приборы для определения линейных размеров тел.

Штангенциркуль (рис. 1) состоит из стальной линейки 1, на которой нанесены миллиметровые деления. Эта линейка имеет неподвижную ножку 2. Вторая ножка 3, имеющая зажимной винт 4, может перемещаться вдоль линейки 1. На обойме этой ножки нанесен нониус 5.

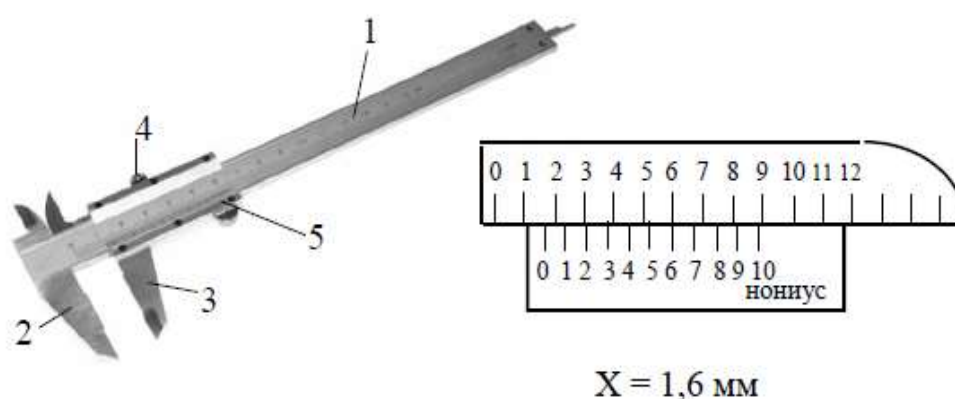


Рис. 1. Штангенциркуль:

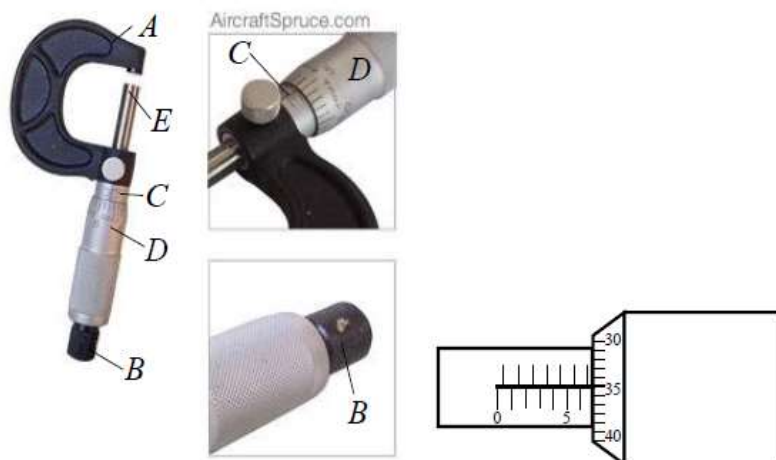
- 1 – стальная линейка; 2 – неподвижная ножка;
3 – ножка (перемещается вдоль линейки 1);
4 – зажимной винт; 5 – нониус

Для измерения размеров какого-либо предмета его помещают между ножками 2 и 3, которые сдвигают до соприкосновения с предметом без сильного нажима, и, закрепив винт 4, делают отсчёт с точностью до десятых или сотых долей миллиметра.

Микрометром (рис. 2) можно произвести измерения линейных размеров небольших тел с точностью до сотых долей миллиметра.

Микрометр состоит из полого стержня C , жёстко соединённого со скобой A . В полость стержня ввинчен микрометрический винт EB . При повороте микровинта вместе с ним вращается барабан D , перемещаясь при этом поступательно относительно стержня C . Наиболее распространён микрометр, у которого цена деления линейной шкалы стержня $b = 0,5 \text{ мм}$. Для удобства верхние и нижние риски шкалы стержня C сдвинуты относительно

друг друга на 0,5 мм, цифры проставлены только у нижней шкалы.



$$X = 6 + 0,5 + 0,35 = 6,85 \text{ (мм)}$$

Рис. 2. Микрометр:

A – скоба; *EB* – микрометрический винт;

C – полый стержень; *D* – барабан

Шаг микровинта $h = 0,5$ мм, цена деления микрометра – 0,01 мм (она указывается).

4.3. Расчёт погрешностей прямых измерений

4.3.1. Измерьте не менее 5 раз искомую величину (например, диаметр цилиндра) и получите ряд близких значений x_i :

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

Результаты измерений занесите в табл. 1.

| № п/п | x_i мм | $\langle x \rangle$ мм | Δx_i мм | Δx_i^2 мм ² | $\sum \Delta x_i^2$ мм ² | $\sigma_{\langle x \rangle}$ мм | $t_{\alpha, n}$ | $\Delta x_{\text{сл}}$ мм | $\Delta x_{\text{пр}}$ мм | Δx мм | ε % |
|----------|-------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | |
| <i>n</i> | | | | | | | | | | | |

где α – коэффициент надёжности, который нужно выбрать самостоятельно (где $\alpha = 0,9; 0,95; 0,99; 0,999$ и т. д.);

$t_{\alpha, n} = 2,8$ – коэффициент Стьюдента для выбранных значений α и числа измерений n . Так, при коэффициенте надёжности

$\alpha = 0,95$ и числе измерений $n = 5$ коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n} = 2,8$.

4.3.2. Вычислите среднее значение измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

где x_i – результат i -го измерения; n – число измерений.

4.3.3. Рассчитайте абсолютную погрешность каждого измерения Δx_i (по модулю):

$$\Delta x_1 = |\langle x \rangle - x_1|, \quad \Delta x_2 = |\langle x \rangle - x_2|, \quad \dots, \quad \Delta x_n = |\langle x \rangle - x_n|. \quad (2)$$

4.3.4. Рассчитайте среднюю квадратичную погрешность отклонения от среднего арифметического:

$$\sigma_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

При обработке результатов измерений пользуемся распределением Стьюдента. С учетом коэффициента Стьюдента $t_{\alpha,n}$ случайная погрешность $\Delta x_{\text{сл}}$

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{\alpha,n} \sigma_{\langle x \rangle}, \quad (4)$$

где α – выбранный коэффициент надежности.

4.3.5. За *приборную погрешность* $\Delta x_{\text{пр}}$ можно принять цену деления шкалы используемого измерительного прибора.

4.3.6. *Абсолютная погрешность* Δx находится по формуле

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2}. \quad (5)$$

4.3.7 *Относительная погрешность* даёт более наглядное представление о качестве измерений. Она определяет, сколько процентов от среднего значения x составляет её абсолютная погрешность

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

4.3.8. Ответ для измеряемой величины записывают в виде доверительного интервала:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x, \text{ (размерность).}$$

Если необходимо, измерения и вычисления погрешностей прямых измерений повторяют и для других величин. Результаты заносят в таблицы, аналогичные табл. 1.

4.4. Расчёт погрешностей косвенных измерений

4.4.1. Для расчёта абсолютной и относительной погрешностей косвенного измерения величины, являющейся функцией нескольких измеряемых величин a, b, c , необходимо определить погрешности каждой величины ($\Delta a, \varepsilon_a, \Delta b, \varepsilon_b, \Delta c, \varepsilon_c$) по схеме, описанной в разделе 4.3.

Абсолютную погрешность искомой величины рассчитываем по формуле

$$\Delta f(x, y, z) = \langle f \rangle \cdot \varepsilon_f,$$

где ε_f – относительная погрешность при косвенных измерениях, которая рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_f = \sqrt{\alpha^2 \varepsilon_x^2 + \beta^2 \varepsilon_y^2 + \gamma^2 \varepsilon_z^2} \quad (7)$$

($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – относительные погрешности (в долях единицы) прямых измерений физических величин, входящих в функциональную зависимость искомой величины).

4.4.2. Определение объема V цилиндра диаметром d и высотой h :

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h.$$

Относительная и абсолютная погрешности измерения объема цилиндра равны:

$$\varepsilon_V = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_h^2}, \quad \Delta V = \frac{\varepsilon_V \langle V \rangle}{100\%}, \quad (8)$$

где среднее значение объема цилиндра определяется соотношением

$$\langle V \rangle = \frac{\pi \langle d \rangle^2}{4} \langle h \rangle. \quad (9)$$

Для расчета погрешности прямых и косвенных измерений объема тела составьте самостоятельно и заполните таблицу 2.

5. Сделайте вывод.

Электроизмерительные приборы

1. Системы электроизмерительных приборов

Электроизмерительным прибором называется устройство, служащее для измерения электрических величин. По принципу действия электроизмерительные приборы относят к системам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Системы электроизмерительных приборов

| Наименование системы | Условные обозначения | Род тока | Приборы данной системы |
|---|---|-------------------------|---|
| Магнитоэлектрическая* |  | Постоянный | Гальванометры, миллиамперметры, милливольтметры, регистрирующие приборы |
| Электромагнитная** |  | Постоянный и переменный | Щитовые амперметры и вольтметры, фазометры |
| Электродинамическая*** |  | Постоянный и переменный | Миллиамперметры переменного тока, переносные амперметры и вольтметры, ваттметры |
| Электродинамическая со сталью (ферродинамическая) |  | Переменный | Регистрирующие: амперметры, вольтметры и ваттметры переменного тока |
| Индукционная |  | Переменный | Счётчики электрической энергии |
| Вибрационная |  | Переменный | Герцметры в цепях переменного тока технической частоты |

| Наименование системы | Условные обозначения | Род тока | Приборы данной системы |
|----------------------|---|-------------------------|--|
| Электростатическая |  | Постоянный и переменный | Вольтметры и киловольтметры постоянного и переменного тока |

* – самые чувствительные из всех систем, самые точные приборы постоянного тока. Шкала прибора – равномерная.

** – самые прочные и дешёвые. Относительно низкая чувствительность. Шкала прибора – неравномерная.




*** – самые точные из приборов переменного тока. Шкала неравномерная. Рабочая часть начинается от 15–20 % шкалы.

Условные обозначения на шкалах приборов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Условные обозначения, применяемые на шкалах электроизмерительных приборов

| Условное обозначение | Содержание обозначения | Условное обозначение | Содержание обозначения |
|---|---|---|---|
| 1,5 | Класс точности прибора 1,5 |  | Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ |
|  | Выпрямительный преобразователь |  | Прибор нормально работает в вертикальном положении |
|  | Прибор предназначен для работы в цепях постоянного тока |  | Прибор нормально работает в горизонтальном положении |
|  | Переменный однофазный ток |  | Прибор нормально работает под углом 60° |

| | | | |
|---|---|---|--|
|  | Трёхфазный ток |  | Зажим для заземления |
| ~ 50 | Прибор нормально работает при частоте 50 Гц |  | Вторая категория защищенности прибора от влияния внешних магнитных полей |

2. Погрешности электроизмерительных приборов

2.1. Класс точности прибора

Класс точности прибора (γ) определяет приведённая относительная погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}$, выраженная в процентах. Применяются следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Обозначение класса точности записывается на шкале прибора в виде соответствующих цифр (см. табл. 2). Иногда класс точности обозначается числом в кружке. Приборы класса точности 0,05 дают наименьшую относительную погрешность измерения и употребляются в точных лабораторных исследованиях, а также как образцовые приборы для проверки менее точных приборов. Приборы остальных классов 0,1–4 относятся к техническим приборам.

2.2. Относительная и абсолютная погрешности измерения

Относительная погрешность ε измерения определяется по классу точности γ прибора:

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \% , \quad (1)$$

где X – показания прибора.

Общая формула для расчёта минимальной абсолютной погрешности имеет вид

$$\Delta A_{\text{приб}} = \frac{\gamma}{100} A_{\text{max}} , \quad (2)$$

где γ – класс точности прибора; A_{max} – верхний предел измерений прибора.

Следовательно, чем ближе измеряемая величина к предельному значению прибора, тем меньше относительная ошибка и тем она ближе к значению класса точности прибора. Электроизмерительный прибор или его предел следует для работы выбирать так, чтобы значение измеряемой величины было близким к предельному (наибольшему) значению шкалы прибора.

2.3. Внутреннее сопротивление прибора

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является его внутреннее сопротивление, определяемое как

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где U_{max} – максимальное падение напряжения на приборе; I_{max} – максимальное допустимое значение силы тока, протекающего через прибор.

3. Многопредельные электроизмерительные приборы

Через измерительный механизм рассмотренных выше электроизмерительных приборов, особенно магнитоэлектрической системы, можно пропускать очень слабый ток. Однако прибор можно использовать для измерения больших токов, если параллельно измерительному механизму подключить дополнительное малое сопротивление, которое называют шунтом. Шунты изготавливаются из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления, имеют форму спиралей, лент или стержней. Если к прибору подключить несколько шунтов, то это даст возможность иметь несколько пределов измерения силы тока. Такой прибор называется многопредельным амперметром. Многопредельный прибор, как правило, имеет переключатель на несколько пределов измерения (пределы указаны около ручки переключения), одну общую клемму * и ряд других клемм ("1, 2, ..."), около которых указаны пределы измерений.

Если последовательно с измерительным механизмом подключить добавочное большое сопротивление, то прибор может быть использован в качестве вольтметра – прибора для измерения напряжения. Вольтметр в электрическую цепь включается параллельно тому участку, на котором измеряется напряжение.

4. Правила пользования многопредельным прибором

Для сохранения целостности и работоспособности многопредельного электроизмерительного прибора, например, амперметра при включении его в электрическую цепь с неизвестной силой тока следует придерживаться следующих правил.

С помощью ручки установки пределов устанавливается максимальный предел на приборе.

Если при замыкании цепи отклонение стрелки амперметра будет незначительным, нужно последовательно уменьшать предел измерения до тех пор, пока отклонение стрелки не окажется в правой части шкалы, где точность измерения будет больше (погрешность меньше).

Для выбранного предела определяют цену одного деления шкалы амперметра

$$Z = I_{\max} / m, \quad (4)$$

где Z – цена одного деления шкалы амперметра для выбранного предела измерений; m – число всех делений шкалы прибора; I_{\max} – максимальное значение силы тока (напряжения), которое может быть измерено на выбранном пределе измерения.

Величина измеряемого тока (напряжения) вычисляется по соотношению

$$I = Zk, \quad (5)$$

где k – деление шкалы прибора, на которое отклонится стрелка при включении прибора в электрическую цепь.

Аналогично определяется цена деления вольтметра.

Лабораторная работа № 2

Определение ускорения силы тяжести

1. Цель работы: изучить метод определения ускорения свободного падения.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] § 14, 22; [2] 1.6, 2.5; ответить на вопросы самоподготовки 1–4. Для выполнения работы необходимо знать: а) законы Ньютона; б) кинематические характеристики движения при свободном падении; в) зависимость ускорения свободного падения от расстояния от центра Земли и географической широты местности; г) расчет погрешностей прямых и косвенных измерений.

3. Описание установки

Установка представляет собой металлическую штангу, жестко закрепленную на стене. На штанге, имеющей шкалу, укрепляется передвижной электромагнит ЭМ, неподвижная ловушка Л с полочкой (заслонкой) С (рис. 2.1).

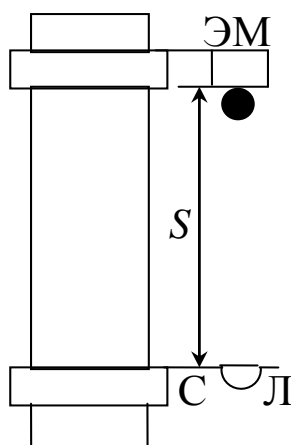


Рис. 2.1. Электромагнит с шариком и заслонкой С

К включенному электромагниту подносят шарик, который при этом притягивается. При выключении цепи электромагнита шарик падает. Время его падения отсчитывается по электросекундомеру ЭС, который включается в момент отрыва шарика от электромагнита и выключается при ударе его о заслонку С. Схема пульта управления магнитом и секундомером приведена на рис. 2.2. Когда тумблер 1 с надписью «секундомер» и тумблер 2 с надписью «магнит» установлены в положениях «вкл.», электросекундомер не работает. При повороте тумблера 2 в положение «выкл.» электромагнит выключается, шарик падает, начинается отсчет времени. При ударе шарика о заслонку С электросекундомер выключается.

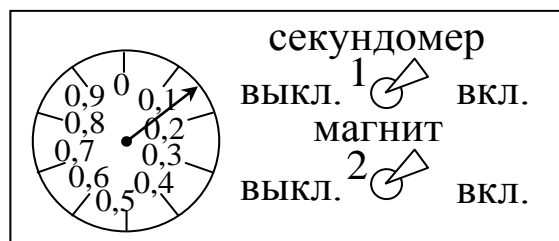


Рис. 2.2. Схема пульта управления магнитом и секундомером

4. Методика измерений и расчета

На падающий шарик действуют три силы: сила тяжести \vec{F} , архимедова сила \vec{F}_A и сила сопротивления \vec{F}_C . Уравнение движения шарика представляется в виде

$$m \vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_A + \vec{F}_C,$$

где m – масса шарика; \vec{a} – ускорение шарика.

Для шарика малых размеров и при малой скорости движения силами \vec{F}_A и \vec{F}_C можно пренебречь, тогда движение тел под действием только силы тяжести называется свободным падением, а ускорение – ускорением свободного падения (ускорение силы тяжести), $a = g$.

$$m \vec{g} = \vec{F}.$$

Кинематическое уравнение движения шарика

$$h = \frac{g t^2}{2}.$$

Ускорение свободного падения зависит от высоты h над уровнем Земли и географической широты φ местности.

Зависимость ускорения свободного падения от высоты определяется законом всемирного тяготения

$$F_3 = G \frac{m M}{(R + h)^2} = m g_h,$$

где F_3 – сила притяжения шарика Землей; G – гравитационная постоянная; m – масса тела; M – масса Земли; g_h – ускорение свободного падения на расстоянии $R + h$ от центра Земли.

Зависимость ускорения свободного падения от географической широты обусловлена суточным вращением Земли и сплюснутостью ее у полюсов ($R_{\text{экв}} = 6378$ км, $R_{\text{пол}} = 6357$ км). Вследствие суточного вращения покоящееся на Земле тело движется по кругу радиуса r , $r = R \cos \varphi$ (рис. 2.3). В этом случае сила тяжести \vec{F} равна векторной сумме $\vec{F} = \vec{F}_3 + \vec{F}_{\text{цб}}$, где $\vec{F}_{\text{цб}}$ – центробежная сила инерции $m \omega^2 r$:

$$\vec{F}_{\text{цб}} = m \omega^2 R \cos \varphi.$$

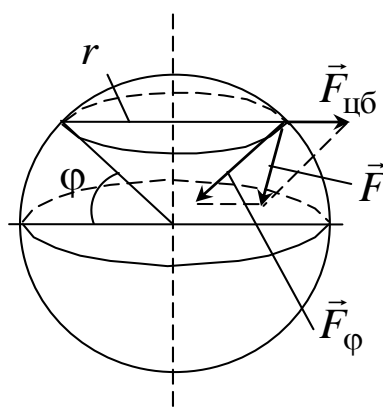


Рис. 2.3. Схема действия сил на тело в зависимости от широты местности φ

Угловая скорость суточного вращения Земли $\omega = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

По теореме косинусов с учетом того, что отношение $\frac{F_{\text{цб}}}{F_3} = 3,4 \cdot 10^{-3}$, и величиной $\left(\frac{F_{\text{цб}}}{F_3} \right)^2$ можно пренебречь, получим

$$g_{\varphi} = g \left(1 - \frac{2\omega^2 R \cos^2 \varphi}{g} \right)^{1/2}.$$

5. Подготовка установки к измерениям

5.1. Поставить тумблеры 1 и 2 (см. рис. 2.2) в положение «выкл.». Укрепить электромагнит на расстоянии S , равном 1–2 м от заслонки. Измерить расстояние S , определить высоту падения шарика $h = S - d$, где d – диаметр шарика.

5.2. Привести заслонку С в горизонтальное положение (см. рис. 2.1). Повернуть тумблеры 1 и 2 в положение «вкл.».

5.3. На специальной подставке поднести к электромагниту металлический шарик, предварительно размагниченный. Он притягивается. Повернуть тумблер 2 в положение «выкл.», шарик падает, электросекундомер включается. При ударе шарика о заслонку С останавливается. По секундомеру определить время падения шарика (с точностью до 0,01 с).

6. Определение ускорения свободного падения

6.1. Провести необходимые измерения времени падения для трех шариков разной массы. Опыт с каждым шариком повторить

5 раз.

6.2. Результаты измерений времени для каждого шарика занести в табл. 2.1. Рассчитать среднее значение времени и использовать его при расчете ускорения свободного падения.

6.3. Рассчитать ускорение свободного падения g для каждого шарика по формуле $g = \frac{2h}{\langle t \rangle^2}$.

6.4. Вычислить абсолютную погрешность Δg для ускорения свободного падения одного из шариков по формуле

$$\Delta g = \langle g \rangle \sqrt{\varepsilon_h^2 + 4\varepsilon_t^2},$$

где $\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h}$ – относительная погрешность при измерении высоты h (Δh принять равной приборной погрешности).

6.5. Относительную погрешность при измерении времени t рассчитать, как при оценке прямых измерений. Результаты расчета занести в таблицу, которую составить самостоятельно.

6.6. Вычислить ускорение свободного падения для г. Кемерово ($\varphi = 55^\circ$).

6.7. Сравнить значения ускорения свободного падения для шариков различной массы.

Таблица 2.1

Результаты измерения времени падения шариков
и расчета ускорения свободного падения

| № п/п | m | h | t | $\langle t \rangle$ | g |
|-------|-----|-----|-----|---------------------|------------------|
| | кг | м | с | с | м/с ² |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

| № п/п | m | h | t | $\langle t \rangle$ | g |
|-------|-----|-----|-----|---------------------|------------------|
| | кг | м | с | с | м/с ² |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

6.8. По результатам измерений и вычислений сделать вывод, чем обусловлена разность экспериментальных данных.

Лабораторная работа № 3

Исследование затухающих электромагнитных колебаний

1. Цель работы: исследование зависимости периода затухающих электромагнитных колебаний от параметров колебательного контура.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] § 154–156; [2] гл. 16; ответить на вопросы самоподготовки 5–10. Для выполнения работы необходимо знать: а) дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение; б) логарифмический декремент затухания, коэффициент затухания; в) период и частоту затухающих колебаний; г) методы определения параметров затухающих колебаний; д) изучить схему лабораторной установки; е) ознакомиться с работой колебательного контура и осциллографа; ж) расчет погрешностей электрических измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

На рис. 3.1 приведена электрическая схема лабораторной установки, состоящая из трансформатора ТР, полупроводникового диода ПД, ключа К, конденсатора С, катушки индуктивности L, резистора R, электронного осциллографа ЭО.

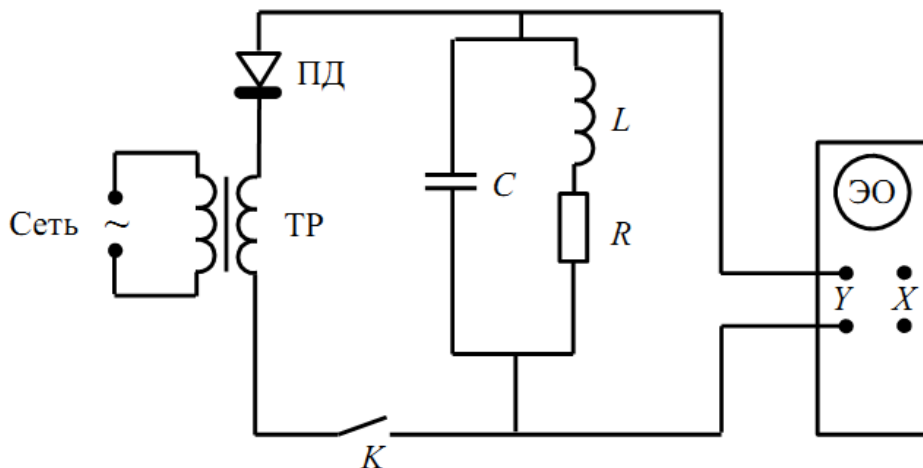


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для изучения затухающих электромагнитных колебаний

Колебания возникают в колебательном контуре, который представляет собой замкнутую цепь, состоящую из конденсатора C , катушки индуктивности L и резистора R . Так как колебания в реальном контуре являются затухающими из-за потерь энергии, необходимо периодически возбуждать контур импульсами напряжения от сети.

Полупроводниковый диод пропускает ток только в одном направлении, поэтому в течение одного полупериода переменного тока происходит зарядка конденсатора, а в течение другого полупериода – разрядка. Таким образом, за каждый период переменного тока ($0,02$ с) в контуре возникает один цуг затухающих колебаний, длительность которого равна $0,01$ с.

3.2. Методика измерений и расчета

При разрядке конденсатора в контуре возникают электромагнитные колебания. Так как в реальном контуре амплитуда колебаний постепенно уменьшается, то колебания являются затухающими рис. 3.2.

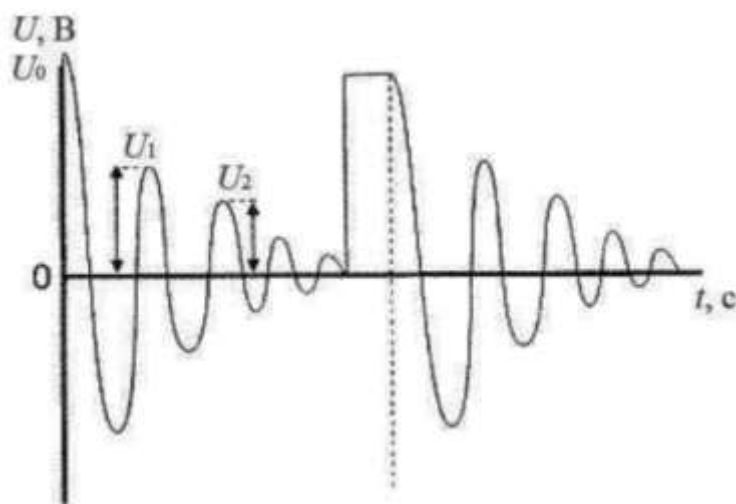


Рис. 3.2. Затухающие колебания в контуре

Напряжение на конденсаторе имеет вид

$$U_C = U_0 e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где $\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний.

При этом

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{и} \quad T_{\text{теор}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}.$$

Из уравнений видно, что амплитуда затухающих колебаний уменьшается со временем по экспоненциальному закону. Быстроту затухания колебаний характеризует логарифмический декремент затухания δ , который представляет собой натуральный логарифм отношения двух амплитуд, отстоящих друг от друга по времени на один период. Теоретическое значение логарифмического декремента затухания определяется по формуле

$$\delta_{\text{теор}} = \ln \frac{U_{10}}{U_{20}} = \ln \frac{U_{10} \cdot e^{-\beta t}}{U_{20} e^{-\beta(t+T)}} = \beta T_{\text{теор}} = \frac{R}{2L} T_{\text{теор}}.$$

При достаточно большом сопротивлении R контура или малой индуктивности L колебания в нем вообще не возникают, а происходит так называемый апериодический разряд конденсатора рис. 3.3.

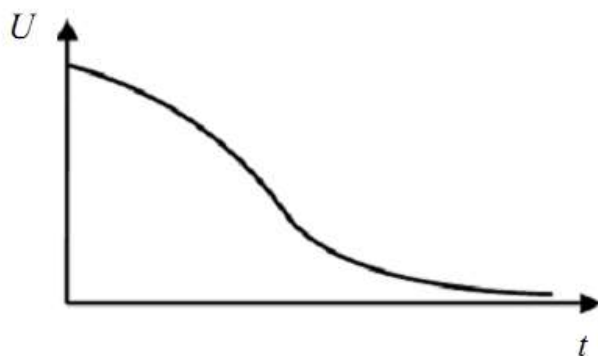


Рис. 3.3. Аперриодический разряд конденсатора

Из формул следует, что в контуре возможны затухающие колебания лишь в том случае, когда $\frac{1}{LC} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$. Если $\frac{1}{LC} < \left(\frac{R}{2L}\right)^2$, то в этом случае возникает аперриодический разряд конденсатора.

Сопротивление $R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ называется критическим.

4. Порядок выполнения работы

1. *Определение периода затухающих колебаний и исследование его зависимости от ёмкости контура*

1.1. Собрать схему в соответствии с рис. 3.1.

1.2. Включить осциллограф.

1.3. Выставить на магазине ёмкостей наименьшую ёмкость. Получить на экране осциллографа устойчивую картину затухающих колебаний в виде цуга, длительность которого составляет 0,01 с.

1.4. Зная число полных колебаний n в одном цуге, экспериментальное значение периода затухающих колебаний можно определить по формуле $T_{\text{эксп}} = \frac{0,01}{N}$.

Однако максимумы в конце цуга трудно различимы, поэтому подсчитать точное число полных колебаний n в цуге не удаётся. В этом случае следует:

а) определить число делений n шкалы экрана осциллографа, укладывающихся в длине цуга (в 0,01 с);

б) определить цену одного деления шкалы, как $\frac{0,01}{n}$;

в) выбрать произвольно число полных колебаний m и подсчитать, сколько делений k шкалы они занимают; определить, сколько делений шкалы приходится на одно колебание. Экспериментальное значение периода затухающих колебаний определить как $T_{\text{эксп}} = \frac{0,01k}{n m}$.

1.5. Повторить эксперимент для пяти различных значений ёмкости. Результат занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Определение периода затухающих колебаний

| № | C | n | m | k | T | T | ε |
|---|-----|------|--------|------|-----|-----|---------------|
| | мкФ | дел. | колеб. | дел. | с | с | % |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

1.6. Определить теоретическое значение периода затухающих колебаний по формуле $T_{\text{теор}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$,

где $R_{\text{кат}} = 14 \text{ Ом}$, $L = 0,0083 \text{ Гн}$.

1.7. Оценить относительное расхождение между $T_{\text{теор}}$ и $T_{\text{эксп}}$ по формуле $\varepsilon = \frac{|T_{\text{теор}} - T_{\text{эксп}}|}{T_{\text{теор}}} \cdot 100\%$.

1.8. Построить график зависимости периода колебаний от ёмкости контура.

2. Определение логарифмического декремента затухания

2.1. Выставить на магазине ёмкостей наименьшую ёмкость C .

2.2. Измерить амплитуду U_{10} в первом максимуме и амплитуду U_{Z0} в произвольном Z -м максимуме.

2.3. Рассчитать экспериментальное значение логарифмического декремента затухания по формуле $\delta_{\text{эксп}} = \frac{1}{Z-1} \ln \frac{U_{10}}{U_{Z0}}$.

2.4. Рассчитать теоретическое значение логарифмического декремента затухания по формуле $\delta_{\text{теор}} = \frac{R}{2L} T_{\text{теор}}$.

2.5. Рассчитать расхождения теоретического и экспериментального значения логарифмического декремента затухания.

2.6. Эксперимент повторить для пяти выбранных ёмкостей. Результаты занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Определение логарифмического декремента затухания

| № | C | U_{10} | U_{Z0} | Z | $\delta_{\text{эксп}}$ | $\delta_{\text{теор}}$ | ε |
|---|-----|----------|----------|-----|------------------------|------------------------|---------------|
| | мкФ | дел. | дел. | шт. | | | % |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

2.7. Построить график зависимости логарифмического декремента затухания от периода колебаний.

3. *Исследование зависимости логарифмического декремента затухания от сопротивления контура*

3.1. Выставить на магазине ёмкостей указанную преподавателем ёмкость. В процессе выполнения этого задания ёмкость контура остаётся неизменной.

3.2. Выставить на магазине сопротивлений $R = 5$ Ом. Определить сопротивление контура по формуле $R_{\text{конт}} = R + R_{\text{кат}}$, где сопротивление катушки $R_{\text{кат}} = 14$ Ом.

3.3. Измерить амплитуду U_{10} в первом максимуме и амплитуду U_{Z0} в произвольном Z -м максимуме.

3.4. Определить логарифмический декремент затухания. Результаты занести в табл. 3.3.

3.5. Эксперимент повторить для пяти выбранных сопротивлений R контура.

3.6. Построить график зависимости логарифмического декремента затухания от сопротивления контура.

4. Определение критического сопротивления контура

4.1. Выставить в магазине ёмкостей наименьшую ёмкость.

4.2. Увеличивая сопротивление контура путём постепенного увеличения сопротивления R на магазине сопротивлений, найти критическое сопротивление $R_{кр}$, при котором наступает апериодический разряд.

Таблица 3.3

Исследование зависимости логарифмического декремента от активного сопротивления контура $C = 1 \text{ мкФ}$

| № | R | $R_{кат}$ | $R_{конт}$ | U_{10} | U_{Z0} | Z | $\delta_{эксп}$ |
|---|-----|-----------|------------|----------|----------|-----|-----------------|
| | Ом | Ом | Ом | дел. | дел. | шт. | |
| 1 | | 14 | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

4.3. Эксперимент повторить для пяти выбранных ёмкостей. Результаты занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Определение критического сопротивления контура

| № | C | $(R_{кр})_{теор}$ | $(R_{кр})_{эксп}$ | ε |
|---|-----|-------------------|-------------------|---------------|
| | мкФ | Ом | Ом | % |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

Лабораторная работа № 4

Определение удельного сопротивления проводника

1. Цель работы: освоить экспериментальный метод определения удельного сопротивления проводника цилиндрической формы.

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] § 114–117; [2] 10.4, 10.7, 10.8; б) ответить на вопросы для самоподготовки 1–11.

Для выполнения работы студент должен:

Знать:

- а) определение электрического тока и его характеристики;
- б) закон Ома для однородного и неоднородного участков электрической цепи;
- в) физическую сущность сопротивления проводника.

Уметь:

- а) пользоваться электроизмерительными приборами;
- б) определять цену деления измерительных приборов;
- в) рассчитывать погрешности при электрических измерениях.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Общий вид установки представлен на рис. 1. Основание

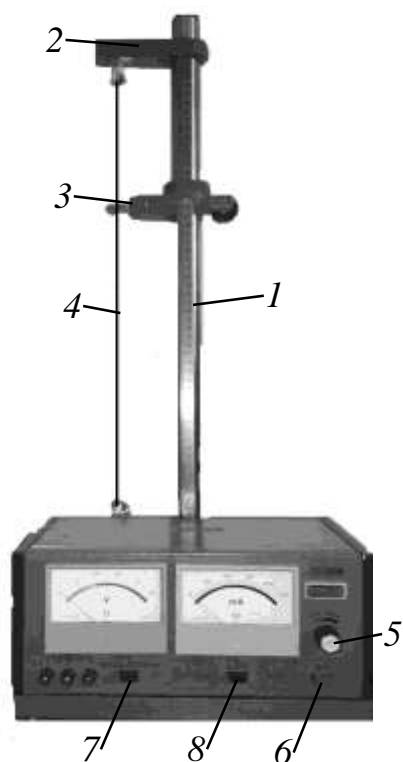


Рис.1. Общий вид установки

оснащено регулируемыми винтами, которые позволяют произвести выравнивание положения прибора. К основанию прикреплена стойка 1 с нанесённой метрической шкалой. На стойке смонтированы два неподвижных кронштейна 2 и один подвижный кронштейн 3, который может передвигаться на стойке и фиксироваться в любом положении. Между кронштейнами натянут металлический провод 4, который прикреплён к зажимам с помощью винтов. Через контакт на подвижном кронштейне обеспечивается хорошее соединение с проводом. Измерительная часть установки находится в корпусе, укрепленном на основании установки. На панели прибора закреплены вольтметр V и миллиамперметр mA .

3.2. Методика измерений и расчёта

Для определения удельного сопротивления ρ материала проводника необходимо измерить его длину ℓ и диаметр d , рассчитать площадь S поперечного сечения и омическое сопротивление R , которые связаны соотношением

$$R = \rho \frac{\ell}{S}.$$

Сопротивление R проводника в данной работе измеряется методом амперметра – вольтметра. В схеме измерения (рис. 2) показание вольтметра U_V равно сумме напряжений на неизвестном сопротивлении U_X и на амперметре U_A :

$$U_V = U_X + U_A = U_X + I_A R_A,$$

где R_A – сопротивление амперметра.

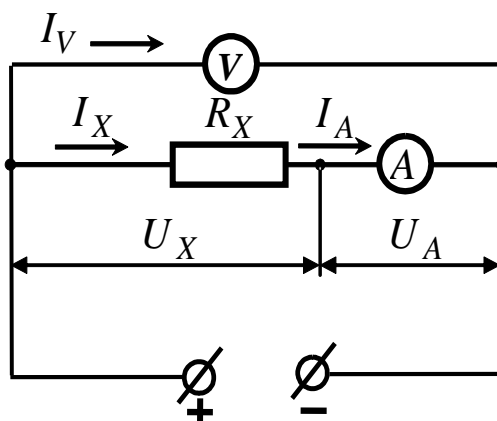


Рис. 2. Электрическая схема для измерения сопротивления

Согласно закону Ома для однородного участка цепи неизвестное сопротивление R_X определяется соотношением:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (1)$$

где R_A – сопротивление амперметра.

3.3. Погрешности измерений

Без учёта погрешностей измерительных приборов неизвестное сопротивление R'_X рассчитывают по упрощённой формуле

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A}. \quad (3)$$

При этом возникает относительная методическая погрешность ε_R измерения сопротивления:

$$\varepsilon_R = \frac{|R_X - R'_X|}{R_X} \cdot 100 \%,$$

где R_X – истинное значение измеряемого сопротивления.

Относительная методическая погрешность измерения сопротивления по указанной схеме определится соотношением

$$\varepsilon = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Следовательно, данную схему можно использовать, когда измеряемое сопротивление во много раз больше сопротивления амперметра ($R_X \gg R_A$). Однако рассмотренный метод не обеспечивает высокой точности, так как погрешность измерения сопротивления этим методом всегда больше суммы приведённых погрешностей обоих приборов.

3.4. Определение параметров измерительных приборов

3.4.1. По шкале приборов определить класс их точности γ и предельные значения $X_{\text{пред}}$ измеряемых величин.

3.4.2. Рассчитать цену деления приборов. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Параметры измерительных приборов

| Параметры приборов | Вольтметр | Амперметр |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| Класс точности γ | | |
| Предел измерения $X_{\text{пр}}$ | | |
| Цена деления | | |
| Внутреннее сопротивление, Ом | 2500 | 0,15 |

3.5. Определение сопротивления провода

3.5.1. Поставить подвижный кронштейн 3 так, чтобы рабочая длина провода была не менее 40–50 см.

3.5.2. Подключить прибор к сети переменного напряжения 220 В. Электрическая схема прибора обеспечивает преобразование переменного напряжения сети в постоянное, которое через потенциометр 5 подаётся в измерительную цепь. Поставить потенциометр в положение минимума снимаемого напряжения (поворот против часовой стрелки).

3.5.3. Нажать клавиши 6 и 7 для измерения сопротивления провода по методу «амперметра – вольтметра», клавиша 8 – отжата.

3.5.4. Вращая ручку потенциометра, снять значения напряжения U_V и силы тока I_A , результаты занести в табл. 2.

3.5.6. Рассчитать напряжение U_X на неизвестном сопротивлении

$$U_X = U_V - U_A = U_V - I_A R_A.$$

Результаты вычислений занести в табл. 2.

3.5.7. Используя графический метод, определить неизвестное омическое сопротивление R'_X без учета падения напряжения на амперметре. Для этого построить график $I_A = f(U_V)$ зависимости силы тока I_A от напряжения U_V (рис. 3), по которому определить котангенс угла $\text{ctg } \varphi$ наклона прямой, проведённой через точки графика:

$$R'_X = \text{ctg } \varphi = \frac{\Delta U_V}{\Delta I_A}.$$

Таблица 2

Результаты измерения вольт-амперной зависимости

| № | U_V , В | I_A , А | U_X , В | R'_X Ом | R_X , Ом | ε_V , % | ε_A , % | ε , % |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |

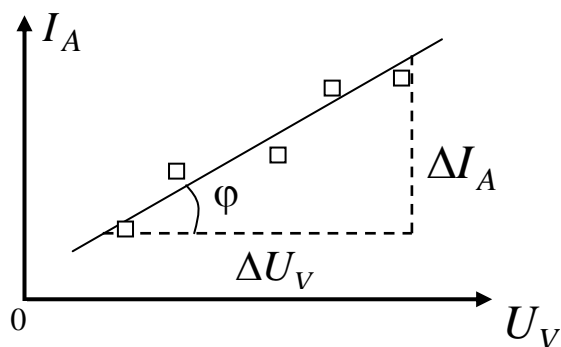


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика проводника

3.5.8. Определить R_X аналогичным способом по графику зависимости $I_A = f(U_X)$.

3.5.9. Рассчитать относительные погрешности ε_V и ε_A отдельных измерений напряжения и силы тока по формуле

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \%$$

и относительную методическую погрешность ε измерения сопротивления по формуле (4).

3.6. Определение удельного сопротивления провода

3.6.1. Рассчитать сопротивление R участков проводника длиной ℓ без учета падения напряжения на амперметре, используя соотношение

$$R = \frac{U_V}{I_A}.$$

Таблица 4

Результаты измерений и расчёта удельного сопротивления
провода $d = 0,36$ мм

| | ℓ , м | U_V , В | I_A , А | $\frac{\ell}{S}$, м ⁻¹ | R , Ом | ρ , Ом·м |
|---|------------|-----------|-----------|------------------------------------|----------|---------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

3.6.2. Рассчитать площадь S поперечного сечения провода диаметром d и отношение ℓ / S участка длины провода к площади поперечного сечения.

3.6.3. Построить графическую зависимость $R = f(\ell / S)$ и по тангенсу угла наклона линии графика определить неизвестное удельное сопротивление ρ материала проводника.

Сделать вывод.

Лабораторная работа № 5

Определение сопротивления методом амперметра – вольтметра

1. Цель работы: освоить экспериментальный метод определения сопротивления проводника.

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] § 114–117; [2] 10.7, 10.8, б) ответить на вопросы для самоподготовки 1–11.

Для выполнения работы студент должен:

Знать:

- а) определение электрического тока и его характеристики;
- б) закон Ома участка электрической цепи;
- в) физическую сущность сопротивления проводника.

Уметь:

- а) пользоваться электроизмерительными приборами;
- б) определять цену деления измерительных приборов;
- в) рассчитывать погрешности при электрических измерениях.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема для определения сопротивления методом амперметра – вольтметра показана на рис. 1. Напряжение, подаваемое от источника питания с помощью ключа К через потенциометр П на неизвестное сопротивление R_X , определяется вольтметром V, ток регистрируется амперметром A.

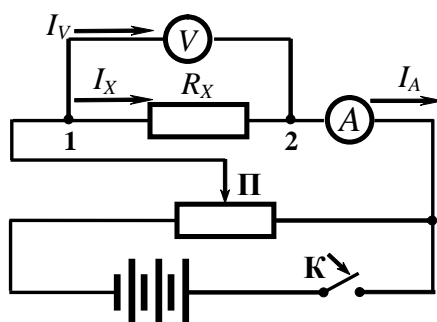


Рис. 1. Электрическая схема для измерения сопротивления

3.2. Методика измерений и расчёта

Сила тока I_A , измеряемого амперметром, равна сумме токов через вольтметр и неизвестное сопротивление:

$$I_A = I_X + I_V = I_X + \frac{U_V}{R_V},$$

где R_V – сопротивление вольтметра.

Тогда неизвестное сопротивление определится из соотношения:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I_A - I_V} = \frac{U_X}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (1)$$

Как видно из формулы (1), при измерении сопротивления R_X методом амперметра – вольтметра в расчётную формулу входит сопротивление R_V вольтметра. Без учета сопротивления вольтметра неизвестное сопротивление рассчитывают по упрощённой формуле

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A}. \quad (2)$$

В этом случае возникает относительная методическая погрешность ε_R измерения сопротивления

$$\varepsilon_R = \frac{R_X - R'_X}{R_X} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где R_X – истинное значение измеряемого сопротивления, рассчитанное по формуле (1).

Относительная методическая погрешность измерения для используемой схемы

$$\varepsilon = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100 \% = \frac{I}{I + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Следовательно, относительная методическая погрешность измерения сопротивления зависит от соотношения измеряемого сопротивления R_X и сопротивления вольтметра R_V . Данную схему измерения можно использовать, когда измеряемое сопротивление во много раз меньше сопротивления вольтметра ($R_X \ll R_V$). Следует отметить, что рассмотренный метод не обеспечивает высокой точности, так как погрешность измерения сопротивления этим методом всегда больше суммы *приведённых погрешностей* обоих приборов.

3.3. Определение параметров измерительных приборов

3.3.1. Повернув переключатель на приборах, выбрать пределы измерения $X_{\text{пр}}$, определить цену деления. Результаты занести в табл. 1.

3.3.2. Определить класс точности приборов γ (указан на шкале прибора). Рассчитать абсолютную погрешность прибора по формуле

$$\Delta A_{\text{приб}} = \frac{\gamma}{100} A_{\text{max}}.$$

3.3.3. Определить максимальный ток I_{max} для вольтметра и максимальное напряжение U_{max} для амперметра (по данным на шкале прибора). Рассчитать внутреннее сопротивление вольтметра R_V и амперметра R_A по формулам:

$$R_V = \frac{U_{\text{пред}}}{I_{\text{max}}}; \quad R_A = \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{пред}}}.$$

Данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Параметры измерительных приборов

| Параметры | Вольтметр | Амперметр |
|---|-----------|-----------|
| Предел измерения | | |
| Цена деления | | |
| Класс точности $\gamma_{\text{пр}}$, % | | |
| Абсолютная приборная погрешность ΔX | | |
| Внутреннее сопротивление, Ом | | |

3.4. Определение сопротивления R_X

3.4.1. Собрать схему, потенциометр П поставить в положение минимума снимаемого напряжения.

3.4.2. Замкнуть ключ К и после проверки схемы преподавателем включить в сеть. Изменяя положение движка потенциометра П, снять показания приборов для значений напряжения U_V и тока I_A . Результаты занести в табл. 2.

3.4.3. Используя графический метод (рис. 2), определить неизвестное омическое сопротивление R'_X без учета сопротивления вольтметра. Для этого построить график $I_A = f(U_V)$ зависимости силы тока I_A от напряжения U_V , по которому определить котан-

генс угла наклона прямой, проведённой через точки графика:

$$R'_X = \operatorname{ctg} \varphi = \frac{\Delta U_V}{\Delta I_A}.$$

3.4.4. По формуле

$$I_X = I_A - I_V = I_A - \frac{U_V}{R_V}$$

рассчитать ток через неизвестное сопротивление R_X . Результаты занести в табл. 2.

3.4.5. По графику зависимости $I_X = f(U_V)$ определить R_X .

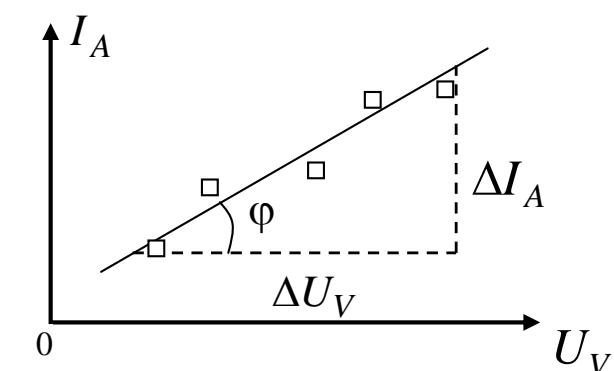


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика проводника

3.4.6. Используя формулу $\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \%$, рассчитать относительную погрешность ε_V измерений вольтметром и ε_A измерений амперметром соответствующих величин напряжения и тока.

3.4.7. По формуле (3) рассчитать относительную погрешность ε_R измерения сопротивления и по формуле (4) методическую погрешность $\varepsilon_{\text{сх}}$ используемой схемы.

Таблица 2

Результаты измерения неизвестного сопротивления и расчёта погрешностей

| № | U_V | I_A | I_X | R'_X | R_X | ε_V | ε_A | ε_R | $\varepsilon_{\text{сх}}$ |
|---|-------|-------|-------|--------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| | В | А | А | Ом | Ом | % | % | % | % |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

Сделать вывод.

Лабораторная работа № 6

Изучение температурной зависимости сопротивления металлов

1. Цель работы: исследовать зависимость сопротивления металлов от температуры, определить температурный коэффициент сопротивления металлов.

2. Подготовка к работе: ознакомиться с описанием лабораторной работы, прочитать в учебных пособиях [1] § 115; [2] 10.5; ответить на вопросы самоподготовки 10–13.

Для выполнения работы студент должен:

Знать:

- а) физическую сущность сопротивления проводника;
- б) вид температурной зависимости сопротивления в области высоких и низких температур;
- в) физический смысл температурного коэффициента.

Уметь:

- а) пользоваться электроизмерительными приборами;
- б) пользоваться методом экстраполяции;
- в) методику работы на установке.

3. Описание установки

Общий вид установки, включаемой в сеть с переменным напряжением 220 В, приведён на рис. 1.

Исследуемый образец представляет металлическое сопротивление, величина которого измеряется мультиметром. Нагрев образца осуществляется электропечью. Для измерения температуры образца применяется термопара.

4. Теоретические основы эксперимента

4.1. Определение температурного коэффициента сопротивления

Зависимость сопротивления R_t металлов от температуры t в области температур, используемых в данном эксперименте, описывается соотношением:

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

где R_0 – сопротивление проводника при температуре 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления металла.



Рис. 1. Установка для изучения зависимости сопротивления металлов от температуры

Температурный коэффициент сопротивления металла определяет относительное изменение сопротивления проводника при изменении его температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Величина температурного коэффициента зависит от структуры кристаллической решётки, упругих свойств металла, вида связи ионов решётки металла. Для большинства металлов температурный коэффициент $\alpha \geq 1/273\text{ град}^{-1}$.

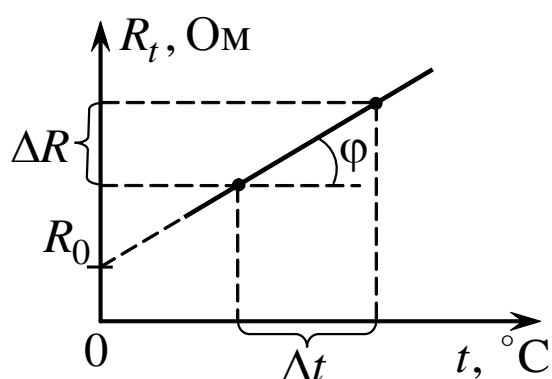


Рис. 2. Линейная зависимость сопротивления металла от температуры

Из соотношения (1) можно выразить температурный коэффициент сопротивления:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}.$$

Значение R_0 и отношения $\Delta R / R_0 = \text{tg} \varphi$ определяются из графика зависимости сопротивления металлов от температуры (рис. 2).

5. Порядок выполнения работы

5.1. Перед включением прибора в сеть ~ 220 В необходимо убедиться в том, что тумблеры «сеть», «питание приборов» и «печь» на левой стороне установки (см. рис. 1) переведены в положение «выкл».

5.2. Для анализа температурной зависимости металлов поставить тумблер на правой стороне прибора в положение «проводник». Указатель термодатчика должен быть поставлен в положение «200 Ом».

5.3. Тумблеры «сеть» и «питание приборов» перевести в положение «вкл». На табло левой шкалы будет отражаться температура печи, следовательно, и температура проводника. На табло правой шкалы будет показано сопротивление проводника при заданной температуре. Записать показания приборов в табл. 1.

5.4. Включить тумблер «печь» и при увеличении температуры на $\Delta t = 5^\circ$ записать в табл. 1 температуру t и величину сопротивления R_t . Не нагревать проводник до температуры выше 70°C .

5.5. Тумблеры «печь», «питание приборов» и «сеть» перевести в положение «выкл».

Таблица 1

Зависимость сопротивления металла от температуры

| | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| № п/п | | | | | | | | | | |
| R_t , Ом | | | | | | | | | | |
| t , $^\circ\text{C}$ | | | | | | | | | | |

5.6. Для определения сопротивления R_0 образца при $t = 0^\circ\text{C}$ и коэффициента α температурного сопротивления построить график $R = R(t)$ зависимости сопротивления проводника от температуры. Ось температуры t необходимо начинать с 0°C , а ось сопротивления R_t — со значения $R < R_{\min}$. Провести прямую между экспериментальными точками и экстраполировать её до пересечения с осью R_t , определяя значение R_0 (см. рис. 2).

Сделать вывод.

Лабораторная работа № 7

Определение индуктивности катушки

1. Цель работы: освоить экспериментальный метод определения индуктивности катушки.

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] § 158, 159; б) ответить на вопросы для самоподготовки 14–22.

Для выполнения работы студент должен:

Знать:

- а) закон электромагнитной индукции и правило Ленца;
- б) понятие о магнитном потоке и индуктивности контура;
- в) метод векторных диаграмм;
- г) понятие магнитной проницаемости среды.

Уметь:

- а) пользоваться электроизмерительными приборами;
- б) определять цену деления измерительных приборов;
- в) рассчитывать погрешности при электрических измерениях.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Электрическая схема лабораторной установки (рис. 1) содержит источник напряжения \mathcal{E} , потенциометр Π , катушку индуктивности L , вольтметр V , амперметр A и ключ K .

Данная электрическая схема предназначена для снятия вольт-амперной характеристики катушки на постоянном (рис. 1, а) и переменном (рис. 1, б) напряжении.

Используемые в данной работе измерительные приборы предназначены для определения как постоянных, так и зависящих от времени значений тока и напряжения. В цепи, содержащей источник переменного напряжения, измеряются эффективные (действующие) значения силы тока I_A и напряжения U .

3.2. Методика измерений и расчёта

Электрический ток I , протекающий в контуре, создает пронизывающий этот контур полный магнитный поток (потокосцепление) Ψ , пропорциональный силе тока:

$$\Psi = LI,$$

где L – коэффициент пропорциональности между силой тока и полным магнитным потоком – индуктивность контура. Индук-

тивность контура зависит от его формы и размеров, а также от магнитных свойств окружающей контур среды.

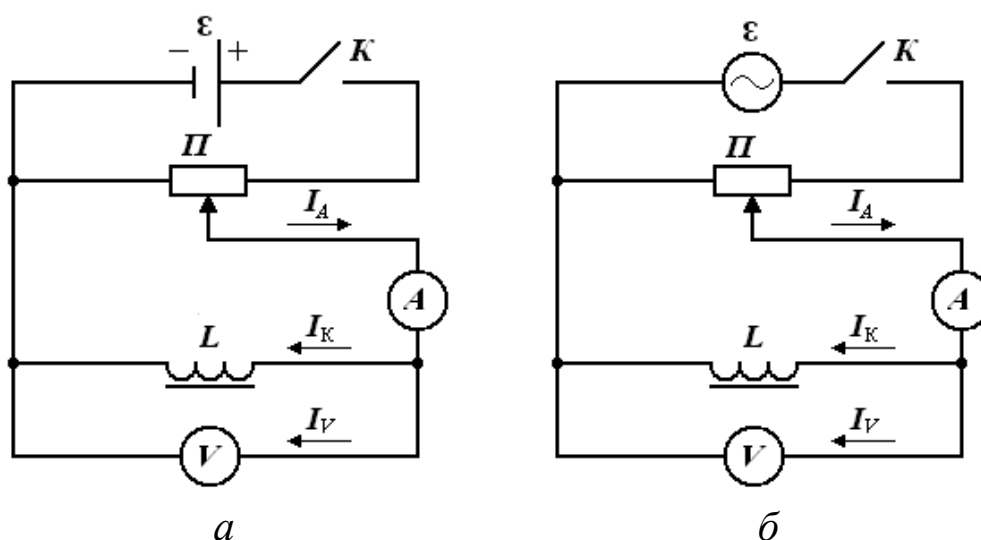


Рис 1. Принципиальная электрическая схема установки с источником постоянного напряжения (а) и переменного напряжения (б)

Изменение силы тока в контуре сопровождается возникновением электродвижущей силы самоиндукции:

$$\mathcal{E}_s = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Для неферромагнитной среды $L = \text{const}$, а при наличии ферромагнетика индуктивность L увеличивается в μ раз, так как магнитная проницаемость μ является переменной величиной и зависит от силы намагничивающего тока и характеристики сердечника.

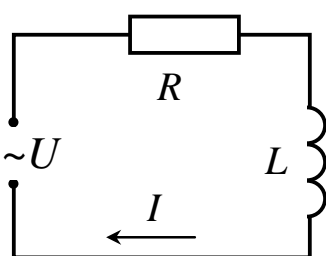


Рис. 2. Участок цепи, содержащий резистор и катушку индуктивности

Рассмотрим процессы, происходящие при протекании переменного тока через участок цепи, содержащий резистор и катушку индуктивности (рис. 2), к концам которого приложено переменное напряжение:

$$U = U_m \cos \omega t,$$

где U_m – амплитуда напряжения; ω – циклическая частота.

Переменный ток можно считать квазистационарным, так как изменения мгновенных значений силы тока происходят достаточно медленно, а электромагнитные возмущения распространяются в цепи со скоростью, равной скорости света в вакууме. Для мгновенных значений квазистационарных токов выполняется закон Ома. Для тока, протекающего через резистор, закон Ома запишется в виде:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t,$$

из которого следует, что падение напряжения на резисторе $U_R = RI_m$ совпадает по фазе с током, протекающим через него.

Для определения силы тока, протекающего через катушку индуктивности, учтем возникновение в ней электродвижущей силы самоиндукции:

$$U_m \cos \omega t - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0.$$

Из этого уравнения следует

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

где $R_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление.

Падение напряжения на катушке $U_L = \omega L I_m \cos \omega t$ опережает по фазе на $\pi/2$ ток, протекающий через катушку.

Амплитуда U_m приложенного напряжения на резисторе U_R

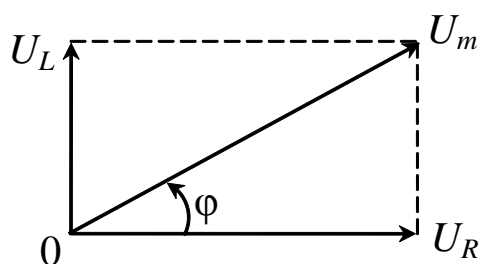


Рис. 3. Векторная диаграмма амплитуд напряжений

и на катушке U_L равна векторной сумме амплитуд этих напряжений (рис. 3). Из прямоугольного треугольника получаем соотношение

$$U_m^2 = U_R^2 + U_L^2,$$

из которого амплитуда силы тока определяется по формуле

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + R_L^2}} = \frac{U_m}{Z},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ – полное сопротивление участка цепи с омическим и индуктивным сопротивлением.

Из полученного соотношения выражаем индуктивность катушки

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переменного напряжения ($\nu = 50$ Гц).

Для экспериментального определения сопротивления R катушки постоянному току и полного сопротивления Z катушки переменному току необходимо снять вольт-амперную зависимость $I = f(U)$, используя электрические схемы, приведённые на рис. 1.

3.3. Определение омического сопротивления R катушки в цепи постоянного тока

3.3.1. Собрать электрическую цепь (рис. 1, а). Обратить внимание на то, что реостат используется в качестве потенциометра. Движок реостата поставить в положение минимума снимаемого напряжения.

3.3.2. После проверки схемы преподавателем замкнуть ключ K , снять вольт-амперную зависимость (показания приборов для значений напряжения U и тока I_A). Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения омического сопротивления катушки $R_V =$

| № | Напряжение U , В | Ток | | | Сопротивле- ние R , Ом |
|---|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|
| | | I_A , А | I_V , А | I_K , А | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

3.3.3. Рассчитать токи, протекающие через вольтметр I_V по формуле $I_V = \frac{U}{R_V}$, где R_V – сопротивление вольтметра R_V (указано на шкале прибора), и катушку I_K по формуле $I_K = I_A - I_V$.

3.3.4. Построить график вольт-амперной зависимости $I_K = f(U)$, откладывая по оси ординат ток катушки I_K , по оси абс-

цисс напряжение U . Котангенс угла наклона прямой, проведённой через точки графика, определяет омическое сопротивление R катушки $R = \operatorname{ctg} \varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I_K}$.

3.4. Определение полного сопротивления Z катушки без сердечника в цепи переменного тока

3.4.1. Собрать электрическую схему 1, б. После проверки схемы преподавателем поставить движок реостата в положение минимума снимаемого напряжения, замкнуть ключ K , снять вольт-амперную зависимость $I_A = f(U)$. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения полного сопротивления катушки без сердечника

| № | Напряже- ние U , В | Ток | | | Сопротивле- ние Z , Ом |
|---|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|
| | | I_A , А | I_V , А | I_K , А | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

3.4.2. Аналогично п. 3.3.3 рассчитать токи, протекающие через вольтметр I_V и катушку I_K , результаты вычислений занести в табл. 2.

3.4.3. Построить график вольт-амперной зависимости $I_K = f(U)$ на одном графике с вольт-амперной зависимостью для постоянного тока. Определить полное сопротивление Z катушки без сердечника.

3.5. Определение полного сопротивления Z_c катушки с железным сердечником в цепи переменного тока

3.5.1. Вставить в катушку железный сердечник и повторить все измерения согласно пп. 3.4.1–3.4.3.

Результаты измерений занести в табл. 3, аналогичную табл. 2.

3.6. Определение индуктивности L катушки и средней магнитной проницаемости μ_c сердечника

3.6.1. Используя соотношение (1) определить индуктивность L катушки без сердечника и индуктивность L_c катушки с железным сердечником.

3.6.2. Рассчитать среднее значение магнитной проницаемости $\langle \mu_c \rangle$ сердечника, используя соотношение:

$$\langle \mu_c \rangle = \frac{L_c}{L}.$$

Сделать вывод.

Вопросы для самоподготовки

1. По каким признакам классифицируются электроизмерительные приборы?
2. В чём заключается устройство и принцип действия электроизмерительных приборов магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем?
3. Рассчитайте сопротивление шунта к миллиамперметру на 100 мА для измерения тока до 2 А ($R_A = 0,1$ Ом).
4. Рассчитайте добавочное сопротивление к милливольтметру на 100 мВ для измерения напряжения до 10 В. Сопротивление вольтметра 2 кОм.
5. Как определяется цена деления многопредельного электроизмерительного прибора?
6. Как найти абсолютную погрешность измерения по классу точности прибора?
7. Как следует включить реостат для изменения силы тока в цепи?
8. Как включить в цепь реостат в качестве потенциометра, то есть для изменения напряжения?
9. Как записывается закон Ома для однородного и неоднородного участка электрической цепи?
10. Что такое сопротивление? Как зависит сопротивление проводника от его параметров?
11. Какие существуют способы определения сопротивления проводника?
12. Как зависит сопротивление проводника от температуры?
13. В чём состоит явление сверхпроводимости?

14. Что такое индуктивность? От чего она зависит и что определяет в цепи синусоидального тока?

15. Какие существуют способы определения индуктивности?

16. Что такое активное, индуктивное и полное сопротивление в цепи переменного тока?

17. Почему при переменном токе сопротивление катушки увеличивается?

18. В чём заключается явление электромагнитной индукции и явление самоиндукции?

19. Как определить направление индукционного тока?

20. Зависит ли индуктивность катушки от величины приложенного напряжения?

21. Как влияет железный сердечник на величину индуктивности катушки?

22. Зачем в катушках индуктивности, используемых в различных устройствах, применяют сердечники из пермаллоя и феррита?

Лабораторная работа № 8 **Определение показателя преломления** **стекла интерференционным методом**

1. Цель работы: получение интерференционной картины методом деления амплитуды и определение показателя преломления стекла.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] § 179–181; [2] 19.1–19.4; ответить на вопросы самоподготовки 11 – 15. Для выполнения работы необходимо знать: а) понятие когерентности волн и методы их получения; б) понятие оптической разности хода волн; в) условия возникновения максимумов и минимумов в интерференционной картине; г) ход лучей в стеклянной пластинке и вывод рабочей формулы.

3. Описание экспериментальной установки и методика проведения работы

Из лазера 1 (рис. 4.1) световой пучок падает на короткофокусную линзу 2 и, становясь расходящимся, освещает плоскопараллельную стеклянную пластину 3, находящуюся на подставке оптической скамьи.

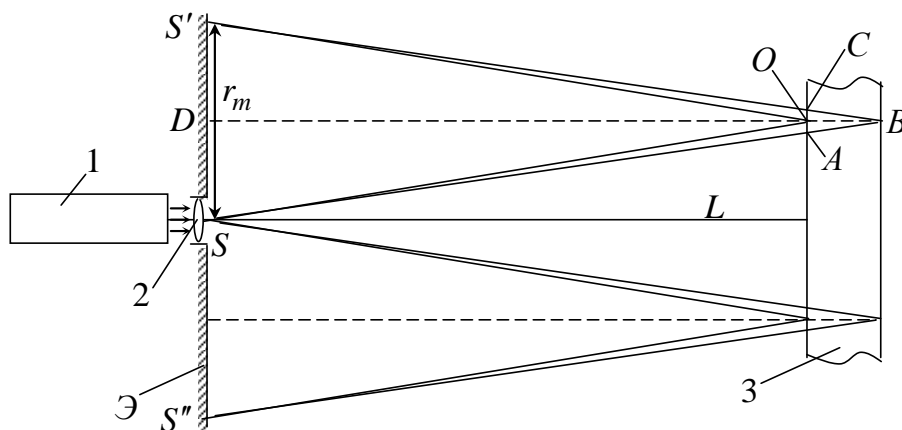


Рис. 4.1. Схема получения интерференционной картины:
A, O, C – точки пересечения лучей с передней гранью пластины; *B* – точка пересечения лучей с задней гранью пластины; *S* – задний фокус линзы 2; *S', S''* – точки, лежащие на темном кольце радиуса r_m

Отражаясь от передней и задней поверхности стекла, световые волны становятся когерентными и интерферируют между собой. На экране Э, поставленном перед пластиной, наблюдается интерференционная картина (ИК) в виде чередующихся светлых и темных колец, называемых полосами равного наклона.

Оптическая разность хода лучей $SABCS'$ и SOS' на рис. 4.2 равна

$$\Delta = 2(AB)n - 2(MO) \pm \lambda / 2.$$

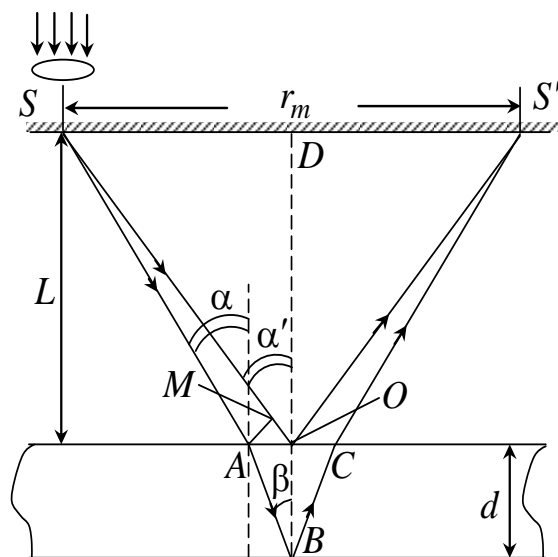


Рис. 4.2. К выводу выражения, связывающего показатель преломления пластины с величиной радиуса темного кольца

Здесь n – показатель преломления; $\lambda/2$ – скачок разности хода при отражении луча SO от оптически более плотной среды (стекла).

Если d – толщина пластины, α и β – углы падения и преломления, то $(AB) = d / \cos \beta$, $(AO) = d \operatorname{tg} \beta$, $(MO) = (AO) \sin \alpha$. Используя закон преломления $\sin \alpha = n \sin \beta$, выражение можно переписать в виде

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \mp \lambda/2.$$

Темные кольца наблюдаются, если разность хода Δ равна

$$\Delta = (2m \mp 1)\lambda/2,$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$ – интерференционный порядок.

Таким образом, каждому темному кольцу соответствует свое значение m . Это значение связано с величиной разности оптических путей двух световых волн, результатом интерференции которых является данное кольцо.

Сравнивая предыдущие формулы, условие наблюдения темных колец представим в виде

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = m\lambda$$

Используем это уравнение для получения выражения для радиуса темного кольца. Для центральной части ИК угол падения α мал, поэтому можно принять, что $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$. Используя ΔSOD , и что $\alpha' \approx \alpha$, получим $\sin \alpha \approx r_m / 2L$, где L – расстояние от источника S до пластины; r_m – радиус m -го темного кольца. Получим по формуле приближенных вычислений:

$$2d\left(n^2 - \frac{1}{2} \frac{r_m^2}{(2L)^2}\right) \approx m\lambda.$$

Здесь использовано то, что $n\sqrt{1-x} \approx n \cdot \left(1 - \frac{1}{2}x\right)$, когда $x \ll 1$.

Откуда следует

$$r_m^2 = 8n^2 L^2 - m4n\lambda L^2 / d.$$

Из рис. 4.1 и 4.2 видно, что кольцу большего радиуса соответствует и большее значение угла падения α . С увеличением же угла падения α , согласно уравнению, уменьшается интерференционный порядок m кольца. Следовательно, самый большой ин-

терференционный порядок m_0 имеет то кольцо, которое находится в центре ИК. Ее центру соответствует $\alpha = 0$. При этом угле падения $2dn = m_0\lambda$, и в самом центре ИК находится темное кольцо с самым большим номером

$$m_0 = \frac{2dn}{\lambda}.$$

Кроме него в центральном темном пятне скрыты темные кольца с номерами от m_0 до k , а первое наблюдаемое имеет номер $m_1 = k - 1$, второе – $m_2 = k - 2$, ..., N -е – $m_N = k - N$.

Запишем уравнение для минимума $(k - N)$ -го порядка

$$r_{k-N}^2 = 8n^2L^2 - (k - N)4n\lambda L^2 / d$$

и для минимума k -го порядка

$$r_k^2 = 8n^2L^2 - k4n\lambda L^2 / d.$$

Разность квадратов радиусов колец равна

$$r_{k-N}^2 - r_k^2 = N4n\lambda L^2 / d.$$

Таким образом, квадрат радиуса кольца *линейно* зависит от его номера N $r_{k-N}^2 = r_k^2 + CN$, где $C = 4n\lambda L^2 / d$.

Введем сокращенные обозначения для радиусов темных колец: $r_N = r_{k-N}$. Тогда уравнение примет вид

$$r_N^2 = r_k^2 + CN.$$

Если результаты измерений радиусов колец представить графически как $r_N^2 = f(N)$, то по точкам графика, в соответствии с зависимостью, можно провести усредняющую прямую. Используя прямую, можно найти значение C как тангенс угла наклона прямой к оси N :

$$C = \frac{\Delta r_N^2}{\Delta N}.$$

После чего показатель преломления можно определить по формуле

$$\langle n \rangle = \frac{d}{4\lambda L^2} C.$$

4. Выполнение работы

4.1. Включите лазер.

4.2. На экран укрепите с помощью прищепок лист миллиметровой бумаги. Сделайте в нем отверстие, совпадающее с центром лазерного луча. Сориентируйте пластину 3 так, чтобы луч, отражаясь от нее, попадал в центр отверстия на бумаге. Получите ИК в виде концентрических колец.

4.3. Перерисуйте ИК на бумагу (или сфотографируйте цифровой камерой).

4.4. Пронумеруйте наблюдаемые темные кольца в порядке возрастания их радиусов: $N = 1, 2, 3 \dots$

4.5. Измерьте диаметры колец по горизонтали D_1 и по вертикали D_2 .

4.6. Найдите средние значения их радиусов $\langle r_N \rangle = \frac{D_1 + D_2}{4}$, а затем квадратов $\langle r_N^2 \rangle$.

4.7. Постройте график зависимости r_N^2 от номера кольца N .

4.8. Из него определите тангенс угла наклона графика, равный значению C , и по формуле $\langle n \rangle = \frac{d}{4\lambda L^2} C$ найдите показатель преломления $\langle n \rangle$.

4.9. Продолжив прямую до пересечения с вертикальной осью, найдите r_k^2 . По формуле

$$k = m_0 \left(1 - \frac{r_k^2}{8n^2 L^2} \right),$$

вычислите значение интерференционного порядка кольца, за которым все последующие кольца были пронумерованы.

4.10. Все результаты измерений и вычислений занесите в табл. 4.1.

4.11. Сделайте вывод о том, почему ИК наблюдается, именно, в виде колец.

Таблица 4.1

Результаты измерений диаметров темных колец
и полученные значения величин: C , $\langle n \rangle$, m_0 , k

| N | D_1 | D_2 | $\langle r_N \rangle$ | $\langle r_N \rangle^2$ | C | $\langle n \rangle$ | m_0 | k |
|-----|-------|-------|-----------------------|-------------------------|----------------|---------------------|-------|-----|
| | м | м | м | м ² | м ² | | | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | |

Лабораторная работа № 9

Определение параметров дифракционной решетки

1. Цель работы: показать, что дифракционная решетка может быть использована в качестве прибора для спектрального анализа;

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] § 182–184; [2] 19.5–19.7; ответить на вопросы самоподготовки 16–21. Для выполнения работы необходимо знать: а) устройство дифракционной решетки, ее период и условие наблюдения главных максимумов; б) порядок расположения цветов в дифракционном спектре относительно центрального максимума; в) разрешающую способность дифракционной решетки на основе критерия Релея; г) как изменится дифракционная картина, если закрыть часть решетки (сверху или сбоку);

3. Описание лабораторной установки и методики измерений

Простейшая дифракционная решетка – это совокупность прозрачных для света участков на плоскости в виде параллельных друг другу прямых узких полос (щелей) шириной a , разделенных непрозрачными участками (штрихами) шириной b . Величина $d = a + b$ называется периодом или постоянной дифракционной решетки. На решетке указывается число штрихов n на 1 мм решетки. Тогда постоянная решетки определяется соотношением:

$$d = \frac{1 \text{ мм}}{n}.$$

Полное число штрихов равно

$$N = nC,$$

где C – ширина решетки.

Схема получения дифракционной картины от решетки показана на рис. 5.1.

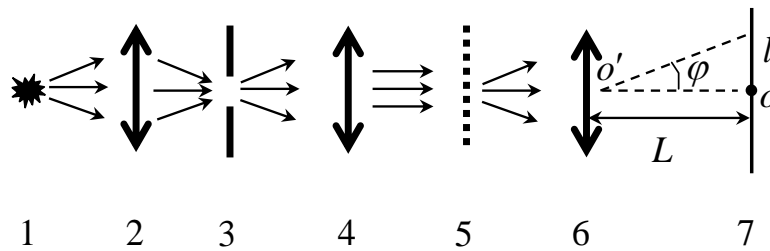


Рис. 5.1. Схема получения дифракционной картины от решетки
1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – спектральная щель (направлена перпендикулярно плоскости рисунка); 4 – линза; 5 – решетка (щели направлены перпендикулярно плоскости рисунка);
6 – линза; 7 – экран

Конденсор 2 концентрирует световую энергию источника на спектральную щель 3. Щель имитирует источник света в виде тонкой прямой вертикальной светящейся нити. Линза 4 превращает падающие на нее расходящиеся пучки света от спектральной щели в параллельные пучки света, распространяющиеся вдоль оптической оси установки. Эти пучки света (плоская волна) падают нормально на решетку. Она устанавливается так, что ее щели параллельны спектральной щели. Угол φ между направлением дифрагировавшего пучка света и перпендикуляром OO' называется углом дифракции. Он принимает значения от 0° до 90° . Линза 6 собирает параллельные пучки света от щелей на экране 7.

При падении плоской волны монохроматического света перпендикулярно решетке дифракционная картина, которая наблюдается на экране, имеет вид ряда тонких линий одинакового цвета, расположенных симметрично относительно центра картины рис. 5.2. Любая такая линия есть результат интерференции параллельных пучков света дифрагировавшими от щелей под

одинаковым углом φ . Каждой линии соответствует свой угол дифракции, который удовлетворяет одному из условий

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, (k = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

где λ – длина волны источника монохроматического света. Значение k (того условия, которому удовлетворяет угол φ), называют порядком спектра.

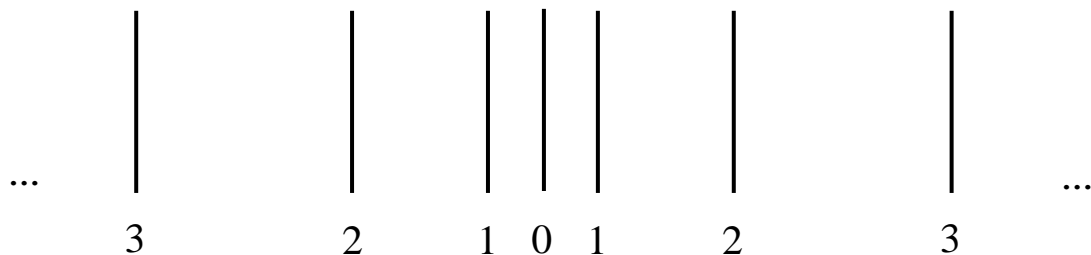


Рис. 5.2. Дифракционная картина от источника монохроматического света

Линия, находящаяся в спектре порядка $k = 0$, является центром дифракционной картины. Ей соответствует угол дифракции, удовлетворяющий условию $d \sin \varphi = 0$.

Для 0-го порядка спектра независимо от длины волны света $\varphi = 0$.

Любому другому порядку спектра k соответствуют две линии. Угол дифракции одной из них удовлетворяет условию

$$d \sin \varphi = -k\lambda,$$

а другой – условию

$$d \sin \varphi = k\lambda.$$

В полном соответствии с симметричным расположением этих линий относительно линии 0-го порядка спектра

$$\varphi_{+k} = -\varphi_{-k}.$$

Чем больше длина волны света, тем дальше линия k -го порядка удалена от центра дифракционной картины. С увеличением порядка спектра k растет угол дифракции, но он не может быть больше 90° . Таким образом, $k \leq d/\lambda$. Следовательно, существует максимальный порядок k_0 , которому соответствует максимальный угол дифракции φ_0 ($\varphi_0 \leq 90^\circ$). k_0 равен целой части отношения d/λ :

$$k_0 = \left\{ \frac{d}{\lambda} \right\}.$$

Интенсивность линий падает с увеличением порядка спектра. По этой причине линии, относящиеся к максимальному порядку спектра, могут отсутствовать в дифракционной картине.

Угол дифракции можно измерить непосредственно или рассчитать по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{L},$$

где l – расстояние на экране от линии спектра k -го порядка до линии спектра 0-го порядка; L – расстояние от линзы 6 до экрана.

После чего можно определить длину волны света

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k},$$

то является важной частью спектрального анализа.

Пусть на решетку падает не монохроматический свет, а более сложный по спектральному составу, состоящий, например, из m компонент.

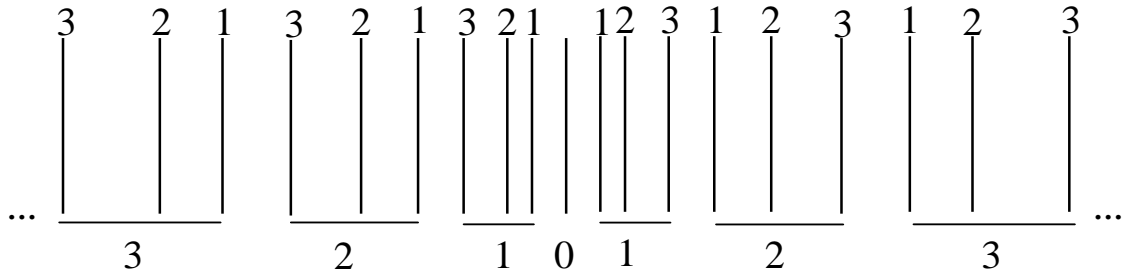


Рис. 5.3. Дифракционная картина от источника, спектральный состав которого состоит из трех компонент, с такими длинами волн, что

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 \text{ и } |\lambda_1 - \lambda_2| < |\lambda_2 - \lambda_3|$$

Каждой компоненте соответствует своя длина волны λ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$). В спектре любого порядка каждой компоненте будет соответствовать своя линия, положение которой определяется величиной длины волны компоненты. Коротковолновая часть спектра расположена ближе к центру дифракционной картины, длинноволновая часть – дальше от него. Исключение составляет спектр 0-го порядка. Он находится в центре дифракционной картины и там все m линий занимают одно и тоже по-

ложение, накладываются друг на друга. Цвет линии спектра 0-го порядка определяется смешением цветов всех линий.

Отличие спектров k -го и $(k + 1)$ -го порядков состоит в том, что в последнем расстояние между линиями больше, чем в первом. Из-за близости длин волн некоторых компонент света соответствующие им линии в спектре k -го порядка могут сливаться, тогда как в спектре $(k + 1)$ -го порядка этого уже может и не быть. В этом отношении критерием спектральных возможностей дифракционной решетки служит разрешающая способность

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda},$$

где $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ – наименьшая разница в длинах волн двух компонент света, при которой линии, соответствующие им в спектре, еще не слились в одну;

$$\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2).$$

В спектре k -го порядка линии, соответствующие компонентам света с разницей длин волн $\Delta\lambda$, не сольются в одну при условии

$$kN \geq R.$$

Дифракционную картину решетки с монохроматическим источником света можно имитировать дифракционной картиной с лазером, так как лазер испускает условно почти монохроматический свет. Пучок света лазера остронаправленный и имеет малое поперечное сечение, поэтому для получения дифракционной картины можно использовать схему без линз и спектральной щели (рис. 5.4).

На экране вместо линий получаем малые световые пятна, что связано с характером излучения источника света.

Угол дифракции может быть рассчитан, если считать, что L – это расстояние от решетки до экрана.

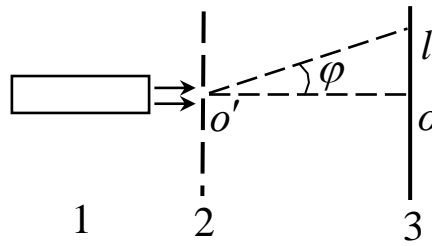


Рис. 5.4. Получение дифракционной картины от решетки с лазером в качестве источника света
1 – лазер, 2 – решетка, 3 – экран

Дифракционная картина решетки с ртутной лампой в качестве источника света может быть получена с использованием упрощенной схемы (рис. 5.5). Отсутствие линзы 6 (рис. 5.1) будет сказываться лишь на качестве изображения спектральных линий на экране. Угол дифракции можно рассчитать, считая однако, что в данном случае L – это расстояние от дифракционной решетки до экрана.

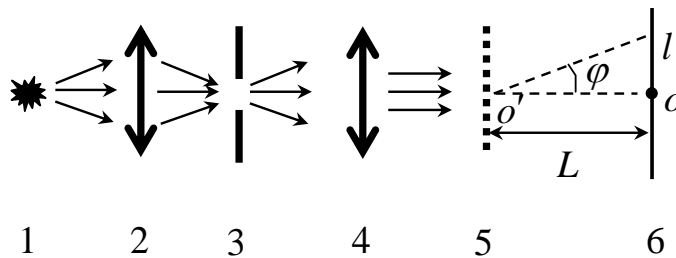


Рис. 5.5. Схема получения дифракционной картины от решетки
1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – спектральная щель (направлена перпендикулярно плоскости рисунка); 4 – линза;
5 – дифракционная решетка; 6 – экран

Когда свет падает перпендикулярно плоскости решетки, то дифракционная картина справа и слева от линии спектра 0-го порядка идентична. Если же решетку из этого положения повернуть относительно вертикальной оси, например, по часовой стрелке на угол α , то условия, которым будут удовлетворять углы дифракции для линий правой части дифракционной картины, запишутся в виде

$$d \cdot [\sin(\varphi - \alpha) + \sin \alpha] = k\lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, \left\{ \frac{d}{\lambda} \right\}).$$

Пусть угол α такой, что

$$d \sin \alpha = k\lambda,$$

тогда

$$\sin(\varphi - \alpha) = 0,$$

откуда

$$\varphi = \alpha.$$

Таким образом, когда угол α равен углу дифракции, соответствующему какой-либо линии спектра, то положение этой линии на экране должно сохраняться. Интенсивность же, как показывает опыт, увеличивается по сравнению с ее величиной до поворота решетки. Последнее можно использовать для того, чтобы увидеть линии в спектрах более высоких порядков, которые обычно не видны из-за малой их интенсивности.

4. Выполнение работы

4.1. Определение длины волны излучения лазера

1.1. Измерить расстояние L от решетки до экрана.

1.2. Включить лазер.

1.3. На экране отметить карандашом (с указанием порядка) положение пятен, соответствующих дифракционным спектрам 0, 1, 2, 3 порядка.

1.4. Снять экран и измерить расстояния l' между отметками одного и того же порядка: $l = \frac{1}{2} l'$.

1.5. Найти постоянную дифракционной решетки зная, что на каждый ее 1 мм приходится 200 штрихов.

1.6. Вычислить значения $\operatorname{tg} \varphi$ для спектров 1, 2, 3 порядка.

1.7. Найти углы дифракции φ для спектров этих порядков.

1.8. Вычислить значения длины волны излучения лазера по каждому углу дифракции.

1.9. Найти среднее значение длины волны $\langle \lambda \rangle$.

1.10. Данные измерений и вычислений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Определение волны излучения лазера

| L | d | k | l' | $\text{tg}\varphi$ | φ | λ | $\langle\lambda\rangle$ |
|-----|-----|-----|------|--------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| мм | мм | | мм | | | нм | нм |
| | | 1 | | | | | |
| | | 2 | | | | | |
| | | 3 | | | | | |

$\lambda_0 = 632,8$ нм – длина волны излучения лазера.

4.2. Определение длины волны, соответствующей желтой линии спектра ртути

2.1. Убедившись в том, что кнопка «Сеть» отжата, подать напряжение 220 В от сети на вход блока питания ртутной лампы.

2.2. Нажать кнопку «Сеть». Нажать на кнопку «Поджиг» несколько раз до загорания лампы.

2.3. Через 5 минут включить вентилятор. Он находится внутри кожуха лампы, не допускает его перегрева.

2.4. Плавно перемещая рейтер линзы вдоль оптической скамьи, найти такое ее положение, когда наблюдаемая линия на экране будет наиболее узкой. Рейтер – устройство для крепления отдельных частей установки на оптической скамье.

2.5. Пометить положение линии на экране крестиком у ее основания. Здесь будет находиться линия спектра 0-го порядка дифракционной картины.

2.6. Взять решетку, содержащую 196 штрихов на 1 мм. Держать решетку можно только за рамку, не касаясь ее самой. Вставить решетку в пазы держателя. Развернуть ее так, чтобы свет падал перпендикулярно плоскости решетки.

2.7. Наблюдая дифракционную картину на экране, уяснить, какие линии относятся к спектрам 1, 2, 3 порядка.

2.8. Убедиться, что четкость изображения любой линии на экране достигается поворотом столика держателя решетки. Использовать это при выполнении работы.

2.9. На экране карандашом отметить (с указанием порядков) положения желтых линий, соответствующих спектрам 1, 2, 3 порядка. Точку ставить у основания линии.

2.10. Измерить расстояние L от решетки до экрана.

2.11. Вынуть из пазов держателя решетку, положить в чехол. Снять экран и измерить расстояния l' между отметками, соответствующими спектрам одного и того же порядка $l = \frac{1}{2}l'$.

2.12. Найти постоянную дифракционной решетки.

2.13. Вычислить значения $\operatorname{tg}\varphi$ для спектров 1, 2, 3 порядка.

2.14. Найти углы дифракции φ для спектров этих порядков.

2.15. Вычислить значения длины волны, соответствующей желтой линии спектра, по каждому углу дифракции.

2.16. Найти среднее значение длины волны $\langle\lambda\rangle$.

2.17. Данные измерений и вычислений занести в табл. 5.2.

λ', λ'' – длина волны дублета. $\lambda' = 576,960$ нм, $\lambda'' = 579,066$ нм.

$$\varepsilon = \frac{\left| \frac{1}{2}(\lambda' + \lambda'') - \langle\lambda\rangle \right|}{\frac{1}{2}(\lambda' + \lambda'')} =$$

Таблица 5.2

Определение длины волны желтой линии спектра ртути

| L | d | k | l' | $\operatorname{tg}\varphi$ | φ | λ | $\langle\lambda\rangle$ |
|-----|-----|-----|------|----------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| Мм | мм | | мм | | | нм | нм |
| | | 1 | | | | | |
| | | 2 | | | | | |
| | | 3 | | | | | |

4.3. Определение разрешающей способности решетки

Настройка установки такая же, как в 4.2.

3.1. Взять решетку, содержащую 1131 штрих на 1 мм. Держать решетку можно только за рамку, не касаясь ее самой. Вставить решетку в пазы держателя. Развернуть ее так, чтобы свет падал перпендикулярно плоскости решетки.

3.2. Плавное разворачивание решетки из этого положения влево, добиться появления линий спектра 1 порядка в левой половине экрана. Таким же образом достичь четкости изображения 2 желтых линий (дублета) этого спектра.

3.3. На экране карандашом отметить положения этих линий. Обозначить метки цифрами I, II. Точки ставить у основания линий.

3.4. Измерить расстояние L от решетки до экрана.

3.5. Вынуть из пазов держателя решетку, положить в чехол.

3.6. Замерить ширину дифракционной решетки C , не вынимая из чехла. Сдать решетку лаборанту.

3.7. Снять экран и измерить расстояния l_I и l_{II} (отметок I и II до метки, соответствующей положению линии спектра 0-го порядка).

3.8. Найти постоянную дифракционной решетки.

3.9. Вычислить число штрихов, приходящихся на всю ширину решетки.

3.10. Найти длины волн дублета желтых линий λ_I , λ_{II} .

3.11. Вычислить разрешающую способность R решетки в спектре 1 порядка.

3.12. Найти минимальную величину разрешающей способности R' , которой должен был бы обладать дифракционный спектр, чтобы разрешить спектральный дублет, соответствующий желтым линиям спектра ртути.

3.13. Вычислить, какова могла бы быть минимальная разница в длинах волн $\Delta\lambda$ спектрального дублета желтых линий, при котором он был бы разрешен в спектре 1 порядка данной решетки. Сравнить с $|\lambda_I - \lambda_{II}|$.

3.14. Данные измерений и вычислений занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Определение длин волн дублета желтых линий спектра ртути

| d | L | l_I | λ_I | l_{II} | λ_{II} | N | R | R' | $\Delta\lambda$ |
|-----|-----|-------|-------------|----------|----------------|-----|-----|------|-----------------|
| мм | мм | мм | нм | мм | нм | | | | нм |
| | | | | | | | | | |

$$C = \quad ; \quad \varepsilon_1 = \frac{|\lambda' - \lambda_I|}{\lambda'} = \quad ; \quad \varepsilon_2 = \frac{|\lambda'' - \lambda_{II}|}{\lambda''} =$$

λ', λ'' – длина волны дублета. $\lambda' = 576,960$ нм, $\lambda'' = 579,066$ нм.

Лабораторная работа № 10

Определение работы выхода электрона из вещества

1. Цель работы: исследовать зависимость фототока от величины задерживающего напряжения и частоты падающего излучения; определить работу выхода фотоэлектронов, красную границу фотокатода.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] § 182–184; [2] 20.1 20.3; ответить на вопросы самоподготовки 22–26. Для выполнения работы необходимо знать: а) сущность явления внешнего фотоэффекта и его законы; б) уравнение Эйнштейна для фотоэффекта; в) работу выхода электронов и красную границу фотоэффекта; г) почему фотоэлектроны выходят из металлического фотокатода с различной скоростью; д) методику определения в работе максимальной кинетической энергии фотоэлектронов, работы выхода и частоты красной границы фотоэффекта.

3. Описание экспериментальной установки

Схема установки приведена на рис. 6.1.

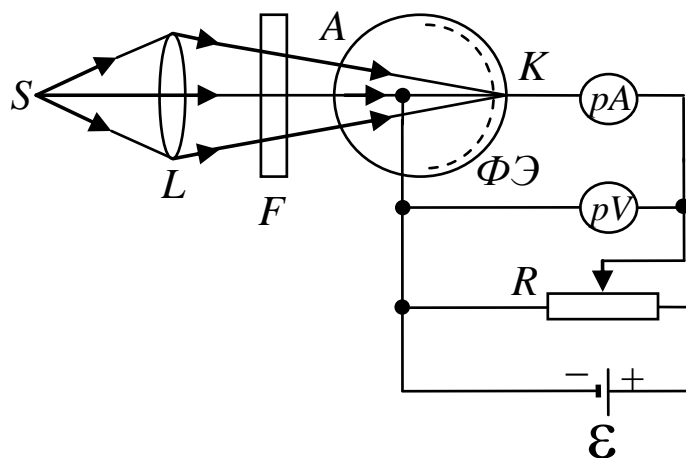


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки:
 S – источник света; L – линза; F – светофильтр;
 $\Phi Э$ – фотоэлемент; pA – микроамперметр;
 pV – милливольтметр; R – потенциометр;
 \mathcal{E} – источник напряжения; A – анод; K – катод

Свет от лампы накаливания S с помощью линзы L фокусируется внутрь вакуумного фотоэлемента $\Phi Э$. Он представляет собой стеклянный баллон сферической формы, на внутреннюю поверхность которого нанесено сурьмяно-цезиевое покрытие,

выполняющее роль фотокатода. С противоположной стороны от катода находится маленький круглый металлический электрод – анод. Работа выхода фотоэлектронов из катода низкая ($\sim 1,8$ эВ), поэтому его можно использовать во всей видимой области спектра. Частоту (или длину волны) падающего на фотокатод света можно менять с помощью селективных светофильтров F .

Между катодом и анодом прикладывается напряжение, величину которого можно регулировать потенциометром R . Сила фототока и напряжение измеряются чувствительными микроамперметром pA и милливольтметром pV соответственно.

4. Теоретические основы эксперимента

Фотоэффект принадлежит к числу явлений, в которых проявляются корпускулярные свойства света. Столкновение фотонов с электронами вещества приводит к выбиванию электронов. Энергетический баланс этого взаимодействия для вылетающих электронов описывается уравнением Эйнштейна

$$h\nu = A + T_{\max},$$

где A – работа выхода электрона из фотокатода; T_{\max} – максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из катода; произведение $h\nu$ определяет энергию фотона частотой ν (h – постоянная Планка).

При освещении даже монохроматическим светом энергия фотоэлектронов оказывается неодинаковой. Электроны в веществе, располагаясь по уровням разрешенных зон, обладают разными энергиями. Под работой выхода A понимают энергию, необходимую для удаления электрона с самых верхних заполненных уровней. Энергия, которую нужно затратить, чтобы удалить электроны с ниже расположенных уровней, превосходит A , и кинетическая энергия таких электронов оказывается меньше. Кроме того, электроны могут терять часть своей энергии на пути к поверхности фотокатода. Уравнением Эйнштейна определяет кинетическую энергию только наиболее быстрых фотоэлектронов (выбитых с верхних уровней зоны проводимости).

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов пользуются, как правило, методом задерживающего потенциала. На анод фотоэлемента прикладывается *отрицательный* по отношению к катоду потенциал. Электроны, энергия которых удовле-

творяет условию $T < eU$ (e – заряд электрона), заворачиваются электрическим полем и возвращаются назад в катод. Поэтому при увеличении обратного напряжения U анодный ток падает. При некотором значении $U = -U_3$ (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода, и анодный ток прекращается. Максимальная кинетическая энергия T_{\max} электронов с зарядом $-e$ связана с запирающим потенциалом U_3 очевидным соотношением:

$$T_{\max} = eU_3.$$

На опыте обычно исследуется зависимость силы тока I в фотоэлементе от величины задерживающего напряжения U (рис. 6.2).

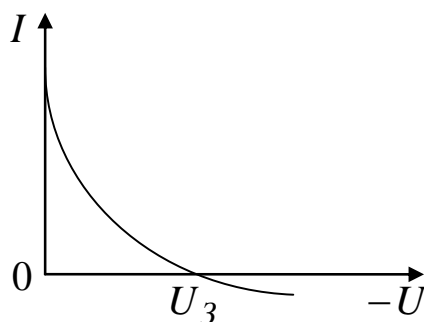


Рис. 6.2. Зависимость фототока от задерживающего напряжения на фотоэлементе

Форма кривой $I = I(U)$ зависит от материала и толщины фотослоя, формы электродов и условий освещения. Поэтому важно знать не саму кривую, а лишь точку пересечения её с осью абсцисс, когда задерживающее напряжение U равно запирающему потенциалу. Точное измерение этого потенциала наталкивается на целый ряд экспериментальных трудностей. Как показывает опыт, кривая $I(U)$ подходит к оси абсцисс под небольшим углом, а в некоторых случаях даже заходит в область отрицательных значений I , как это изображено на рис. 6.2. Такой ход кривой связан: а) с наличием обратного фотоэффекта – фотоэффекта с анода; б) с ионными токами в фотоэлементе; в) из-за несовершенства вакуума в нём. Наконец, в электрической цепи, собранной из различных проводников, существует контактная разность потенциалов, которая так же искажает зависимость I от U .

Из сказанного следует, что для определения величины запирающего потенциала необходимо правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость к нулю. Для применяемого в работе фотоэлемента типа сферического конденсатора с фотока-
тодом на внутренней поверхности стеклянного баллона справедливо соотношение:

$$\sqrt{I} \sim (U_3 - U),$$

где U – текущее обратное напряжение. При $U = U_3$ сила тока равна нулю.

Заменим кинетическую энергию электронов в уравнении Эйнштейна работой электрического поля, получим:

$$h\nu = A + eU_3 \quad \text{или} \quad eU_3 = h\nu - A.$$

Из этого соотношения вытекает идея работы. Нужно исследовать зависимость фототока от величины задерживающего напряжения U , и из графика \sqrt{I} от U определить потенциал за-
пирапия U_3 . Это надо проделать, освещая фотоэлемент светом разной частоты ν , и затем построить зависимость $T_{\max} = eU_3$ от частоты ν , которая, согласно уравнению Эйнштейна, должна иметь вид прямой линии (рис. 6.3).

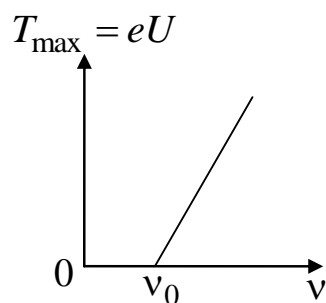


Рис. 6.3. Зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектрона от частоты света

По наклону прямой на графике можно определить постоянную Планка:

$$\frac{dT_{\max}}{d\nu} = h.$$

Прямая пересечёт ось частот ν , где $T_{\max} = 0$, в точке, равной частоте красной границы фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}.$$

5. Порядок выполнения работы

5.1. Подвиньте осветитель с лампочкой вплотную к стойке светофильтра.

5.2. Включите электрическую цепь тумблером K , при этом должна засветиться лампа накаливания S и на анод A фотоэлемента будет подано отрицательное напряжение от источника ε (см. рис. 6.1).

5.3. С помощью потенциометра R установите нулевое напряжение на фотоэлементе.

5.4. Поставьте перед фотоэлементом синий светофильтр, пропускающий свет на длине волны 436 нм.

5.5. Плавно увеличивая напряжение, снимите зависимость показаний микроамперметра μA от величины тормозящего напряжения. Особенно аккуратно нужно проводить измерение U вблизи потенциала запираения, когда сила тока стремится к нулю. Результаты измерений силы фототока I и задерживающего напряжения U занесите в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерения фототока при разном напряжении
и на разных частотах падающего света

| Задерживающее напряжение U , мВ | Цвет светофильтра | | |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | синий | зелёный | жёлтый |
| | $\nu = 6,88 \cdot 10^{14}$ Гц | $\nu = 5,49 \cdot 10^{14}$ Гц | $\nu = 5,18 \cdot 10^{14}$ Гц |
| | I , мкА | I , мкА | I , мкА |
| U_1 | | | |
| U_2 | | | |
| U_3 | | | |
| ... | | | |
| U_n | | | |

5.6. Проведите аналогичные измерения для других светофильтров: зелёного ($\lambda = 546$ нм) и жёлтого ($\lambda = 579$ нм).

5.7. Для каждой частоты падающего света постройте график зависимости силы фототока от задерживающего напряжения в координатах (\sqrt{I}, U) и определите величину запирающего потенциала U_3 путём экстраполяции полученной прямой линии до её пересечения с осью абсцисс.

5.8. Рассчитайте максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, выбиваемых из катода светом разной частоты. Результаты занесите в табл. 6.2.

5.9. Графически изобразите зависимость $T_{\max} = eU_3$ от частоты излучения ν (см. рис. 1.3). Проведя линию до пересечения с осью частот, найдите красную границу фотоэффекта из сурьмяно-цезиевого катода и работу выхода фотоэлектронов из него:

$$A = h\nu_0$$

Таблица 6.2

Результаты определения запирающего потенциала, максимальной энергии фотоэлектронов, красной границы, работы выхода материала катода и величины постоянной Планка

| Частота ν , 10^{14} Гц | U_3 , В | T_{\max} , эВ | ν_0 , Гц | A , эВ | $h_{\text{экс}}$, Дж·с |
|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------|----------|----------------------------|
| 5,18 | | | | | |
| 5,49 | | | | | |
| 6,88 | | | | | |

5.10. По тангенсу наклона графика $T_{\max}(\nu)$ к оси абсцисс рассчитайте постоянную Планка:

$$h_{\text{экс}} = \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta \nu} = \frac{T_{\max}}{\nu - \nu_0}$$

5.11. Сделайте вывод о результатах работы, сравнив свои значения работы выхода и постоянной Планка с табличными значениями.

Лабораторная работа № 11

Проверка законов внешнего фотоэффекта

1. Цель работы: исследовать зависимость фототока от величины задерживающего напряжения и частоты падающего излучения; определить работу выхода фотоэлектронов, красную границу фотокатода.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] §§ 182–184; [2] 20.1 20.3; ответить на вопросы самоподготовки 6–10. Для выполнения работы необходимо знать: а) сущность явления внешнего фотоэффекта и его законы; б) уравнение Эйнштейна для фотоэффекта; в) работу выхода электронов и красную границу фотоэффекта; г) почему фотоэлектроны выходят из металлического фотокатода с различной скоростью; д) методику определения в работе максимальной кинетической энергии фотоэлектронов, работы выхода и частоты красной границы фотоэффекта.

3. Описание экспериментальной установки

Схема установки приведена на рис. 3.1.

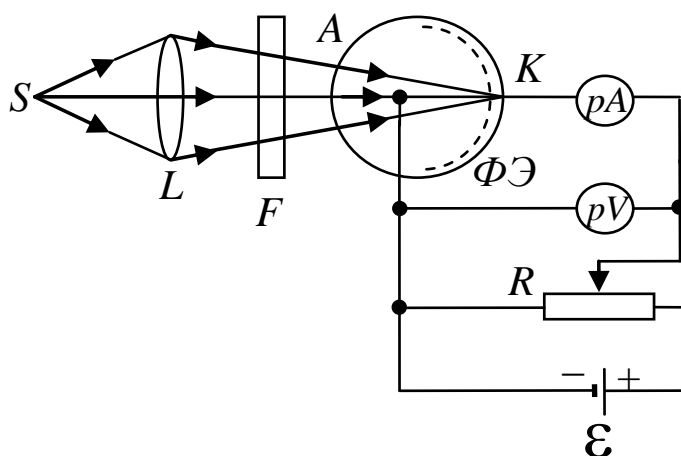


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:
 S – источник света; L – линза; F – светофильтр;
 $\Phi Э$ – фотоэлемент; pA – микроамперметр;
 pV – милливольтметр; R – потенциометр;
 ε – источник напряжения; A – анод; K – катод

Свет от лампы накаливания S с помощью линзы L фокусируется внутри вакуумного фотоэлемента $\Phi Э$. Он представляет собой стеклянный баллон сферической формы, на внутреннюю

поверхность которого нанесено сурьмяно-цезиевое покрытие, выполняющее роль фотокатода. С противоположной стороны от катода находится маленький круглый металлический электрод – анод. Работа выхода фотоэлектронов из катода низкая ($\sim 1,8$ эВ), поэтому его можно использовать во всей видимой области спектра. Частоту (или длину волны) падающего на фотокатод света можно менять с помощью селективных светофильтров F .

Между катодом и анодом прикладывается напряжение, величину которого можно регулировать потенциометром R . Сила фототока и напряжение измеряются чувствительными микроамперметром μA и милливольтметром mV соответственно.

4. Теоретические основы эксперимента

Фотоэффект принадлежит к числу явлений, в которых проявляются корпускулярные свойства света. Столкновение фотонов с электронами вещества приводит к выбиванию электронов. Энергетический баланс этого взаимодействия для вылетающих электронов описывается уравнением Эйнштейна

$$h\nu = A + T_{\max},$$

где A – работа выхода электрона из фотокатода; T_{\max} – максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из катода; произведение $h\nu$ определяет энергию фотона частотой ν (h – постоянная Планка).

При освещении даже монохроматическим светом энергия фотоэлектронов оказывается неодинаковой. Электроны в веществе, располагаясь по уровням разрешенных зон, обладают разными энергиями. Под работой выхода A понимают энергию, необходимую для удаления электрона с самых верхних заполненных уровней. Энергия, которую нужно затратить, чтобы удалить электроны с ниже расположенных уровней, превосходит A , и кинетическая энергия таких электронов оказывается меньше. Кроме того, электроны могут терять часть своей энергии на пути к поверхности фотокатода. Уравнением Эйнштейна определяет кинетическую энергию только наиболее быстрых фотоэлектронов (выбитых с верхних уровней зоны проводимости).

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов пользуются, как правило, методом задерживающего потенциала. На анод фотоэлемента прикладывается *отрицательный* по отноше-

нию к катоду потенциал. Электроны, энергия которых удовлетворяет условию $T < eU$ (e – заряд электрона), заворачиваются электрическим полем и возвращаются назад в катод. Поэтому при увеличении обратного напряжения U анодный ток падает. При некотором значении $U = -U_3$ (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода, и анодный ток прекращается. Максимальная кинетическая энергия T_{\max} электронов с зарядом $-e$ связана с запирающим потенциалом U_3 очевидным соотношением:

$$T_{\max} = eU_3.$$

На опыте обычно исследуется зависимость силы тока I в фотоэлементе от величины задерживающего напряжения U (рис. 3.2).

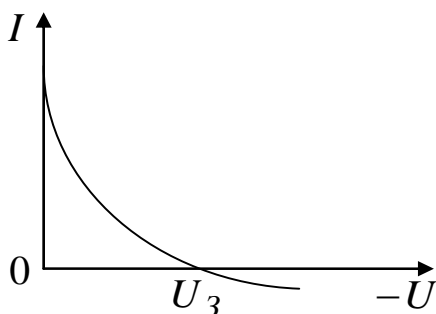


Рис. 3.2. Зависимость фототока от задерживающего напряжения на фотоэлементе

Форма кривой $I = I(U)$ зависит от материала и толщины фотослоя, формы электродов и условий освещения. Поэтому важно знать не саму кривую, а лишь точку пересечения её с осью абсцисс, когда задерживающее напряжение U равно запирающему потенциалу. Точное измерение этого потенциала наталкивается на целый ряд экспериментальных трудностей. Как показывает опыт, кривая $I(U)$ подходит к оси абсцисс под небольшим углом, а в некоторых случаях даже заходит в область отрицательных значений I , как это изображено на рис. 3.2. Такой ход кривой связан: а) с наличием обратного фотоэффекта – фотоэффекта с анода; б) с ионными токами в фотоэлементе; в) из-за несовершенства вакуума в нём. Наконец, в электрической цепи, собран-

ной из различных проводников, существует контактная разность потенциалов, которая так же искажает зависимость I от U .

Из сказанного следует, что для определения величины запирающего потенциала необходимо правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость к нулю. Для применяемого в работе фотоэлемента типа сферического конденсатора с фотока-
тодом на внутренней поверхности стеклянного баллона справедливо соотношение:

$$\sqrt{I} \sim (U_3 - U),$$

где U – текущее обратное напряжение. При $U = U_3$ сила тока равна нулю.

Заменим кинетическую энергию электронов в уравнении Эйнштейна работой электрического поля, получим:

$$h\nu = A + eU_3 \quad \text{или} \quad eU_3 = h\nu - A.$$

Из этого соотношения вытекает идея работы. Нужно исследовать зависимость фототока от величины задерживающего напряжения U , и из графика \sqrt{I} от U определить потенциал за-
пирания U_3 . Это надо проделать, освещая фотоэлемент светом разной частоты ν , и затем построить зависимость $T_{\max} = eU_3$ от частоты ν , которая, согласно уравнению Эйнштейна, должна иметь вид прямой линии (рис. 3.3).

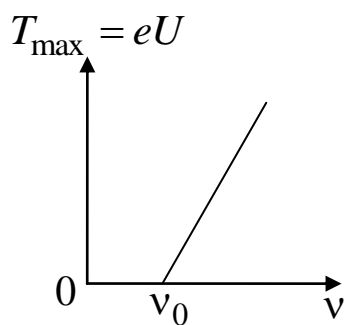


Рис. 3.3. Зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектрона от частоты света

По наклону прямой на графике можно определить постоянную Планка:

$$\frac{dT_{\max}}{d\nu} = h.$$

Прямая пересечёт ось частот ν , где $T_{\max} = 0$, в точке, равной частоте красной границы фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}.$$

5. Порядок выполнения работы

5.1. Подвиньте осветитель с лампочкой вплотную к стойке светофильтра.

5.2. Включите электрическую цепь тумблером K , при этом должна засветиться лампа накаливания S и на анод A фотоэлемента будет подано отрицательное напряжение от источника \mathcal{E} (см. рис. 3.1).

5.3. С помощью потенциометра R установите нулевое напряжение на фотоэлементе.

5.4. Поставьте перед фотоэлементом синий светофильтр, пропускающий свет на длине волны 436 нм.

5.5. Плавно увеличивая напряжение, снимите зависимость показаний микроамперметра μA от величины тормозящего напряжения. Особенно аккуратно нужно проводить измерение U вблизи потенциала запираения, когда сила тока стремится к нулю. Результаты измерений силы фототока I и задерживающего напряжения U занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерения фототока при разном напряжении
и на разных частотах падающего света

| Задерживающее напряжение U , мВ | Цвет светофильтра | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | синий | зелёный | жёлтый |
| | $\nu = 6,88 \cdot 10^{14}$ Гц | $\nu = 5,49 \cdot 10^{14}$ Гц | $\nu = 5,18 \cdot 10^{14}$ Гц |
| | I , мкА | I , мкА | I , мкА |
| U_1 | | | |
| U_2 | | | |
| U_3 | | | |
| ... | | | |
| U_n | | | |

5.6. Проведите аналогичные измерения для других светофильтров: зелёного ($\lambda = 546 \text{ нм}$) и жёлтого ($\lambda = 579 \text{ нм}$).

5.7. Для каждой частоты падающего света постройте график зависимости силы фототока от задерживающего напряжения в координатах (\sqrt{I}, U) и определите величину запирающего потенциала U_3 путём экстраполяции полученной прямой линии до её пересечения с осью абсцисс.

5.8. Рассчитайте максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, выбиваемых из катода светом разной частоты. Результаты занесите в табл. 3.2.

5.9. Графически изобразите зависимость $T_{\max} = eU_3$ от частоты излучения ν (см. рис. 3.3). Проведя линию до пересечения с осью частот, найдите красную границу фотоэффекта из сурьмяно-цезиевого катода и работу выхода фотоэлектронов из него:

$$A = h\nu_0$$

Таблица 3.2

Результаты определения запирающего потенциала, максимальной энергии фотоэлектронов, красной границы, работы выхода материала катода и величины постоянной Планка

| Частота ν , 10^{14} Гц | U_3 , В | T_{\max} , эВ | ν_0 , Гц | A , эВ | $h_{\text{экс}}$, Дж·с |
|---|-----------|-----------------|--------------|----------|----------------------------|
| 5,18 | | | | | |
| 5,49 | | | | | |
| 6,88 | | | | | |

5.10. По тангенсу наклона графика $T_{\max}(\nu)$ к оси абсцисс рассчитайте постоянную Планка:

$$h_{\text{экс}} = \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta \nu} = \frac{T_{\max}}{\nu - \nu_0}$$

5.11. Сделайте вывод о результатах работы, сравнив свои значения работы выхода и постоянной Планка с табличными значениями.

Вопросы для самоподготовки

- 1 Что называется ускорением свободного падения?
- 2 Как ускорение свободного падения зависит от высоты и широты местности?
- 3 Запишите кинематическое и динамическое уравнения движения шарика.
- 4 Сформулируйте законы Ньютона.
- 5 Чем отличается реальный колебательный контур от идеального?
- 6 Объяснить принцип образования колебаний в контуре.
- 7 Что называется коэффициентом затухания?
- 8 Как определить частоту и период затухающих колебаний, частоту собственных колебаний контура?
- 9 Что называется логарифмическим декрементом затухания, как его определить?
- 10 Что называется критическим сопротивлением контура, как его определить?
- 11 Почему в опыте наблюдают интерференционную картину в отраженном, а не в проходящем свете?
- 12 Вычислите максимальную разность хода в пластине, сравните ее с длиной цуга когерентности для многомодового лазера.
- 13 Почему не наблюдается интерференции солнечного света в оконном стекле?
- 14 Расскажите об одном из случаев применения интерференции в тонких пленках:
- 15 Можно ли наблюдать интерференционную картину от двух независимых многомодовых лазеров? Одномодовых лазеров?
- 16 Какое явление называется дифракцией света?
- 17 Дифракция света на дифракционной решетке а) в монохроматическом свете? б) в белом свете?
- 18 Запишите условие главных максимумов для дифракционной картины.
- 19 Изменяется ли дифракционная картина при изменении а) темного промежутка? б) ширины щели? в) при изменении угла падения лучей на дифракционную решетку?
- 20 Чем отличается дисперсионный спектр от дифракционного в белом свете?

21 От чего зависит разрешающая способность дифракционной решетки?

22 Каковы основные положения квантовой теории света?

23 Как проявляется взаимодействие фотонов с электронами вещества?

24 Какое явление называется внешним фотоэффектом? Каковы его закономерности?

25 8. Объясните законы внешнего фотоэффекта с точки зрения квантовой природы света.

26 Каково практическое использование явления внешнего фотоэффекта?

27 Что такое корпускулярно-волновой дуализм?

28 Характеристики фотонов: энергия, импульс, масса.

Список литературы

1. Фирсов А. В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей [Электронный ресурс]: учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / А. В. Фирсов ; под ред. Т. И. Трофимовой. – Москва: Академия, 2017. – 352 с. – Режим доступа:

<http://academia-moscow.ru/reader/?id=227482#copy>.

2. Дмитриева В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля [Электронный ресурс]: учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева. – Москва: Академия, 2017. – 448 с. – Режим доступа:

<http://academia-moscow.ru/reader/?id=213496#copy>.