Л.И. Бондаренко
Е. Г. Чернобай

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Министерство образования и науки Украины
Государственное учреждение
«Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко»

Л.И. Бондаренко, Е. Г. Чернобай

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Методические рекомендации к выполнению лабораторных работ.
Для студентов инженерно-технических и естественных факультетов университетов

Старобельск
ГУ «ЛНУ имени Тараса Шевченко»
2017

УДК
ББК

Рецензенты

Янчевский И.В. - доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической механики НТУУ «КПИ».

Дырда В.И. - доктор технических наук, заведующий отделом, механики эластомерных конструкций горных машин, ИГТМ им. Н.С. Полякова, ДГАЭУ.

Козуб Ю.Г. - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физико-технических систем и информатики Луганского национального университета имени Тараса Шевченко.

Общая физика : методические рекомендации для выполнения лабораторных работ. Для студентов инженерно-технических и естественных факультетовуниверситетов. / сост. : Л.И. Бондаренко, Е. Г. Чернобай ; Гос. учрежд. «Луган. нац. ун-т имени Тараса Шевченко». – Старобельск : Изд-во ГУ «ЛНУ имени Тараса Шевченко», 2017. – 85 с.

В пособии представлены рекомендации и указания к выполнению лабораторного практикума по физике. Каждая работа содержит краткие теоретические сведения, детальное описание экспериментальных установок и последовательность выполнения, снабженное расчетными формулами и методами оценки правильности полученных результатов.

Предназначено для студентов специальностей естественного и технического циклов подготовки, студентов физических специальностей, а также будет полезно для преподавателей высших учебных заведений, колледжей, лицеев, гимназий, школьных учителей.

УДК
ББК

Рекомендовано к печати учебно-методическим советом
Луганского национального университета имени Тараса Шевченко
(протокол № от 31 марта 2017 года)

© Бондаренко Л.И., Чернобай Е. Г., 2017
© ГУ «ЛНУ имени Тараса Шевченко», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ.....5
Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ 7
Лабораторная работа № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ КАМЕРТОНА МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА 10
Лабораторная работа №3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ КВИНКЕ.....16
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО СТОКСУ 18
Лабораторная работа № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПО ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЯ 21
Лабораторная работа № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА 23
Лабораторная работа № 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ 27
Лабораторная работа №8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....28
Лабораторная работа № 9 ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА 32
Лабораторная работа № 10 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 33
Лабораторная работа № 11 РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 43
Лабораторная работа № 12 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРА ОТ НАГРУЗКИ 45
Лабораторная работа № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ 49
Лабораторная работа № 14 ИЗУЧЕИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА.....52
Лабораторная работа № 15 ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 59
Лабораторная работа № 16 ИЗУЧЕНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНФОРМАТОРА.....61
Лабораторная работа №17 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА С ПОМОЩЬЮ ДВУХ ВОЛЬТМЕТРОВ 65
Лабораторная работа №18 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ТОНКИХ ЛИНЗ.....66
Лабораторная работа № 19 ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ 71
Лабораторная работа №20 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛАСТИНОК С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА.....74
Лабораторная работа №21 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА 77
Лабораторная работа №22 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ...80
Лабораторна робота № 23 ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ РАСТВОРАМИ 81
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА 86
ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ 87
АННОТАЦИЯ 88

ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Перед работой в лаборатории физики студент обязан пройти общий инструктаж по технике безопасности и инструктаж на рабочем месте.

ПОДГОТОВКА СТУДЕНТА К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Подготовка студента к выполнению лабораторного эксперимента осуществляется в два этапа.

I этап − внеаудиторная подготовка. На этом этапе студент должен изучить теоретические основы лабораторного эксперимента по методическим указаниям и рекомендованной литературе.

II этап − подготовка в лаборатории. На этом этапе студент должен ознакомиться с устройством прибора (установки) и правилами обращения с ним, разработать целесообразную таблицу для записи результатов.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью сохранения оборудования и успешного выполнения лабораторного эксперимента студент проходит краткое собеседование. Для допуска к проведению эксперимента необходимо знать:

1. Цель опыта.
2. Сущность физических явлений и свойств объектов, изучаемых в ходе эксперимента; выводы расчетных формул.
3. Устройство, принцип действия приборов и правила работы с ними; схему экспериментальной установке; ответы на контрольные вопросы.

Получив советы и разрешение преподавателя, студент самостоятельно приводит экспериментальную установку в рабочее состояние и убеждается в нормальном её функционировании, проводит все необходимые измерения в количестве, достаточном для оценки погрешности эксперимента, выполняет расчеты, оформляет отчёт и представляет его преподавателю.

В тех случаях, когда студент не закончил оформление отчёта, он предъявляет результаты прикидочных расчетов преподавателю (который их визирует) и с его разрешения завершает оформление отчета вне аудитории.

0ТЧЁТ О ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Отчет о лабораторном эксперименте должен содержать: название и цель эксперимента, расчетные формулы, оптическую схему установки, (прибора), таблицу с результатами, графики (на миллиметровой бумаге), конечный результат и краткие выводы.

В ходе собеседования по результатам эксперимента студент должен показать понимание сущности физических явлений и законов, используемых в лабораторной работе, умение выводить расчетные формулы, знание оптической схемы прибора (установки) и функционального назначения его элементов, умение представлять результаты измерений в соответствии с требованиями ГОСТа, умение анализировать результаты и делать обоснованные выводы.

Примечания:

1. При обработке результатов эксперимента сначала решить, с какими погрешностями (случайными, систематическими ИЛИ промахами) придётся иметь дело и использовать соответствующую методику расчета погрешностей.

2. При обработке следить за тем, чтобы точность результатов измерений соответствовала точности измерений.

3. Использовать стандартную форму записи чисел.

4. Пользоваться целесообразными функциональными шкалами при построение графиков.

5. Цену деления выражать (по возможности) целым числом.

6. Согласовать точность измерений и отсчетов по графику.

7. Для рационального использования поля графика оцифровку по осям координат начинать со значений, немного меньших тех, которые получены во время эксперимента.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Цель работы - научиться определять плотность твердых тел правильной геометрической формы с помощью штангенциркуля, микрометра и технических весов.

Необходимое оборудование - штангенциркуль, микрометр, технические весы с разновесами до 10 мг, тела правильной различной геометрической формы.

Краткие теоретические сведения

Плотностью тела называется физическая величина, которая определяется отношением массы тела к его объему, т.е. чтобы найти плотность ρ данного тела, необходимо массу m этого тела разделить на его объем V:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1.1}$$

В СИ плотность измеряется в килограммах на кубический метр (кг/м^3).

Объем тела правильной геометрической формы определяют по соответствующим формулам геометрии.

1. Объем прямоугольного параллелепипеда

$$V=abh\,, \tag{1.2}$$

где a - длина; b - ширина; h - высота.

2. Объем цилиндра

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h\,, \tag{1.3}$$

где d - диаметр цилиндра; h - его высота.

3. Объем шара

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{6}\pi d^3 \tag{1.4}$$

Подставляя в формулу (1.1) значения объема из равенств (1.2) - (1.4), получаем:

для прямоугольного параллелепипеда

$$\rho = \frac{m}{abh} \tag{1.5}$$

для цилиндра

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} \tag{1.6}$$

для шара

$$\rho = \frac{6m}{\pi d^3} \tag{1.7}$$

Используя формулы (1.5) - (1.7), можно рассчитать плотность. Тела будем взвешивать на технических весах, а их линейные размеры будем определять штангенциркулем и микрометром. Очевидно, в том случае, когда одна из измеряемых линейных величин значительно меньше другой, например в десять раз, то измерять ее необходимо микрометром, а большую величину - штангенциркулем, чтобы качество измерения, определяемое относительной погрешностью, в обоих случаях было одинаковым.

Описание приборов

Штангенциркуль. Основу этого прибора составляет масштабная линейка -А (рис.1.1), по которой передвигается вспомогательная линейка - нониус, находящаяся в середине выреза муфты В. Обычно 10 делений нониуса равны 9 мм масштабной линейки (рис.1.2), т.е. каждое деление нониуса равно 0,9 мм. При плотно сдвинутых ножках штангенциркуля нуль нониуса должен сравняться с нулем масштабной линейки.

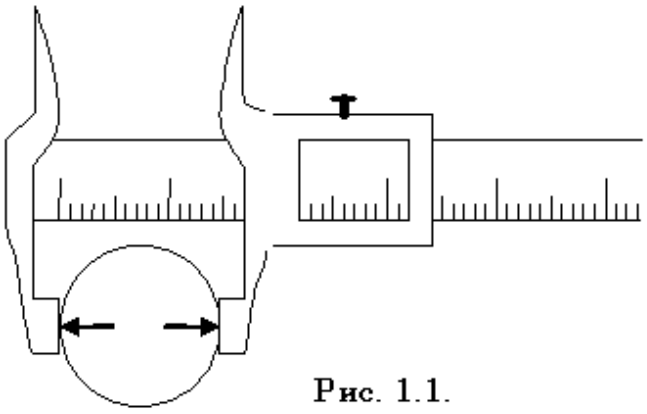


Рис. 1.1.

Чтобы найти размеры данного тела, необходимо его поместить между ножками штангенциркуля и если при этом нуль нониуса совпадает с каким-либо делением масштабной линейки, то, очевидно, цифра возле этого деления и покажет размеры измеряемого тела в миллиметрах (мм). Но такое случается очень редко. Обычно нуль нониуса попадает между делениями масштабной линейки, тогда смотрят, какое деление нониуса совпадает с той или иной меткой (делением) масштабной линейки. Цифра возле этого деления нониуса и покажет число десятых частей миллиметра. Это хорошо видно из рис.1.1 и 1.3, где диаметр измеряемого тела равен 23,4 мм. Действительно, нуль нониуса сместился вправо от 23 мм на какое-то расстояние x . Это расстояние можно определить, рассуждая таким образом: если четвертое деление нониуса совпадает с каким-то делением масштабной линейки (на рис.2.3 это будет 27-е деление), то третье деление нониуса дает смещение правее на 0,1 мм относительно предыдущего деления масштабной линейки (т.е. 26-го); второе деление нониуса дает уже смещение правее на 0,2 мм относительно 25-го деления масштабной линейки, первое - на 0,3 мм, а нуль - на 0,4 мм.

Рис. 1.2

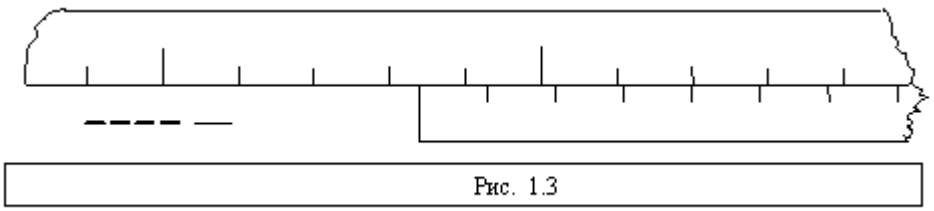


Рис. 1.3

Для определения внутренних диаметров тела (размеров отверстий) штангенциркуль имеет вверху другую пару ножек, которые вставляются в отверстие и раздвигаются до отказа. Если же этих специальных ножек, предназначенных для измерения внутреннего диаметра трубок, нет, то необходимо принять во внимание толщину нижних ножек при измерении отверстий.

Микрометр. Этим прибором измеряют толщину пластинок, диаметр проволоки и т.д. Он имеет вид тисков, в которые зажимается с помощью микрометрического винта измеряемый объект. Микрометр состоит из массивной скобы - рамки А, которая имеет на концах цилиндрические отверстия с винтовой резьбой (рис.1.4). С левого конца рамки ввинчивается опорная пята В, а с правого - микрометрический винт С, шаг которого обычно равен 1 мм (при одном полном обороте винт перемещается на 1 мм).

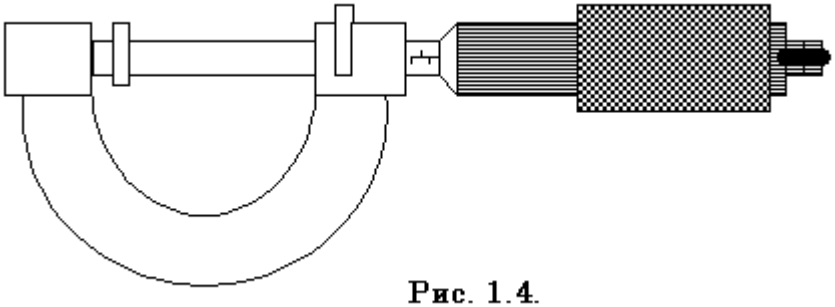


Рис. 1.4.

К винту прикреплен барабан D, разделенный по кругу на 100 равных частей. Очевидно, что при повороте барабана на одно деление винт переместится на 0,01 мм. Отсчет производят относительно продольной линии, нанесенной на неподвижную цилиндрическую часть Е рамки А. На этой же продольной линии нанесена миллиметровая шкала, по которой отсчитывается число целых миллиметров, а сотые доли миллиметра - по барабану D .

При упоре микрометрического винта С- в пяту В нулевое деление барабана должно совмещаться с поперечной чертой. Если этого не происходит, необходимо подрегулировать пяту В , ввинченную в раму или индивидуальную погрешность прибора принимать во внимание при измерениях.

Современные микрометры имеют, как правило, шаг винта 0,5 мм, а круг барабана делится на 50 равных частей; точность же измерения остается прежней (0,01 мм).

Основной источник ошибок при измерениях микрометром - неодинаковый нажим микрометрического винта на измеряемый объект. Чтобы избежать этой ошибки, следует воспользоваться специальным устройством в микрометре - трещоткой К, которая дает возможность выполнять измерения с одинаковым нажимом (трещоткой необходимо пользоваться всегда, когда микрометрический винт соприкасается с измеряемым телом).

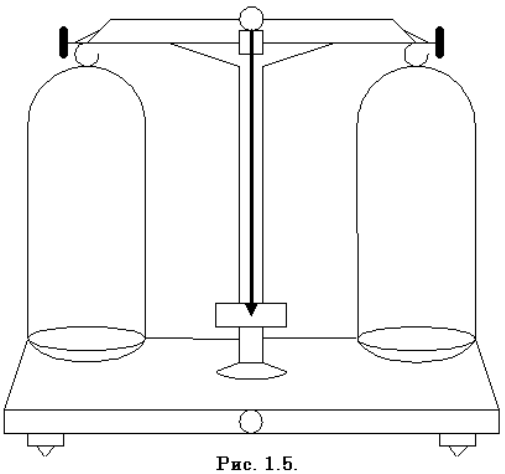


Рис. 1.5.

Технические весы очень похожи на аналитические. Хотя они не имеют такой чувствительности и точности, но все-таки это достаточно точный прибор. На них можно взвешивать с точностью до 0,01 г (10 мг). Эти весы (рис.1.5) имеют отвес В для установления колонки А весов в вертикальное положение, арретир - тормоз С для защиты призм от изнашивания, когда весами не пользуются, и установочные винты D и D_1 для установки стрелки на середину шкалы в момент равновесия ненагруженных весов.

Перед началом взвешивания на технических весах необходимо:

1) установить колонку весов по отвесу;
2) проверить правильность показаний весов (при равновесии ненагруженных весов стрелка должна быть на середине шкалы);
3) взвешиваемое тело кладут на левую чашку весов, а разновесы – на правую;
4) класть и снимать тело и разновесы следует только при арретированных весах;
5) разновесы брать только пинцетом, переходя при взвешивании постепенно от больших разновесов к меньшим;
6) разновесы должны находиться только либо на чашках весов, либо в соответствующих гнездах коробки;
7) по окончании взвешивания весы должны быть заарретированы.

Порядок выполнения работы

1. Взвесить каждое тело на технических весах с точностью до 10 мг.
2) Измерить величины, необходимые для определения плотности данных тел: одни - штангенциркулем, а другие - микрометром с точностью, которую допускают измерительные приборы.

Взвешивать тела и измерять их линейные размеры необходимо3 раза; результаты измерений занести в таблицу.

Подставляя в формулы (1.5) - (1.7) средние значения всех измеряемых величин, можно рассчитать значение искомой плотности ρ для каждого данного твердого тела, оценить погрешности и представить результат в стандартном виде.

Контрольные вопросы

1. Размерность плотности в системе единиц СИ?
2. В каких случаях необходимо пользоваться двумя измерительными приборами (например , штангенциркулем и микрометром) разной точности?
3. Как устроен штангенциркуль? Как с помощью него снять измерения?
4. Как пользоваться микрометром?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ КАМЕРТОНА МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

Цель работы - ознакомиться с устройством камертона, явлениями, происходящими при звучании камертона, со стоячими волнами; исследовать явление акустического резонанса в столбе воздуха и определить частоту колебаний камертона.

Необходимое оборудование - экспериментальная установка, камертон, резиновый молоточек, масштабная линейка.

Краткие теоретические сведения

Камертон, представляющий собой U -образный упругий стержень прямоугольного сечения (рис.2.1), является источником звука. Он принадлежит к группе источников, работающих на собственной частоте.

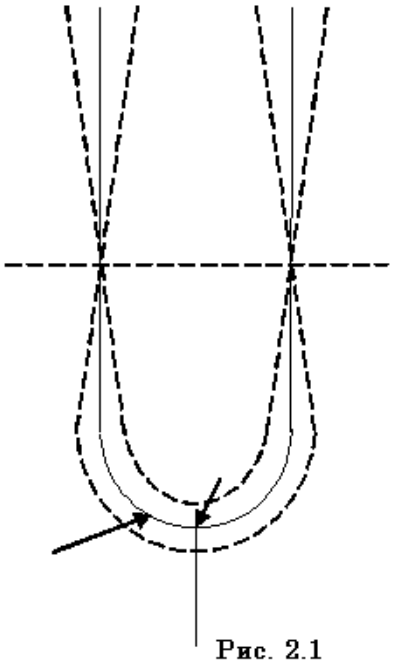


Рис. 2.1

При свободных колебаниях в камертоне устанавливается стоячая волна. На линии АА, расположенной ниже середины ножек, создаются узлы смещения. При сближении ножек Н в области К возникает деформация растяжения и стержень С (основание камертона) несколько приподнимается. При взаимном удалении ножек в области К возникает деформация

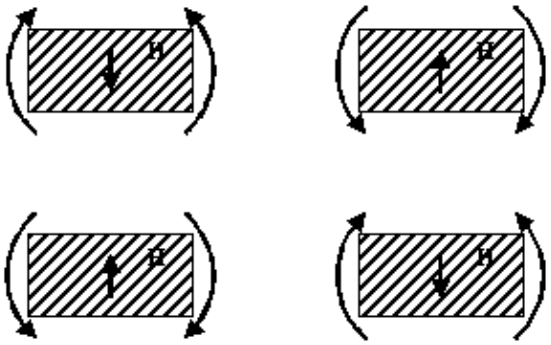


Рис. 2.2

сжатия, стержень С опускается, но одновременно приподнимается участок D так, что центр масс камертона всегда остается в покое. U -образная форма камертона способствует образованию в нем стоячих волн, частота которых соответствует основному тону; возбуждение гармоник затруднено.

Особенность стоячей волны в камертоне состоит в том, что на ножках камертона колебания поперечные, а на основании (стержень С) - продольные. Таким образом, стержень С совершает продольные колебания с частотой, равной частоте колебаний ножек камертона.

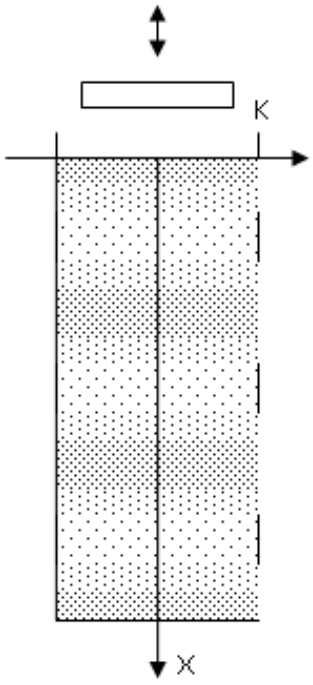


Рис. 2.3

Находясь в воздухе, колеблющиеся ножки камертона создают с противоположных сторон давления, различающиеся по фазе на π . Так как "импульсы" давлений распространяются со скоростью звука, то выравнивание давлений при малых размерах ножек камертона происходит весьма быстро, сжатие и разрежения, "обегая" ножки, почти компенсируют друг друга. При этом большая часть энергии тратится на "перекачку" воздуха с одной стороны ножки камертона на другую (рис.2.2). Кроме того, и сами ножки камертона колеблются в противофазе, а поэтому излучения от них ослабляют друг друга. Камертон излучает звук, поскольку ослабление волн не происходит полностью. Излучаемая камертоном звуковая волна представляет собой продольную волну какой-либо одной частоты, зависящей от массы ножек и их упругих свойств.

Камертон изобретен в I711 г., но сохранил свое значение до нашего времени. Он прост, дешев, транспортабелен, имеет малое затухание, а потому получаемые от него звуковые волны приближаются к синусоидальным (чистым гармоническим музыкальным тонам). Все это обусловливает его широкое использование для настройки музыкальных инструментов и для других целей.

Рассмотрим стоячие волны, являющиеся результатом интерференции двух одинаковых бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу. Такие волны чаще

всего образуются при наложении волн, падающих на какое-нибудь тело и отраженных от него.

Если взять столб газа (воздуха), заключенного в цилиндрический сосуд, и начать периодически сжимать его в направлении, указанном стрелкой (рис.2.3), то образующиеся при этом продольные бегущие волны, достигнув дна сосуда, отражаются и распространяются в обратном направлении. При этом они складываются с волнами, исходящими от непрерывно колеблющегося источника К. В результате каждая частица воздуха, заключенного в сосуде, будет одновременно участвовать в двух колебаниях. Результирующее смещение любой частицы газа можно найти путем алгебраического сложения смещений, так как они происходят вдоль одной прямой.

Пусть отражение происходит от среды, более плотной, чем газ. Тогда деформация сжатия, достигшая дна сосуда (границы раздела сред), не может привести его в движение. Поэтому за сжатием в падающей волне будет следовать сжатие в отраженной волне, за растяжением в падающей волне - растяжение в отраженной волне. Это приводит к тому, что при отражении от более плотной среды фаза колебания изменяется на противоположную (то есть на π). Кроме того, поскольку отраженная волна движется в обратном направлении, то ее скорость имеет противоположный знак. Рассмотрим случай, когда отраженная волна имеет ту же амплитуду, что и падающая:

$$a_{пад}(x,t) = A_0 \sin \omega(t - \frac{x}{c}); \qquad (2.1)$$

$$a_{отр}(x,t) = A_0 \sin[\omega(t + \frac{x}{c}) + \pi] = A_0 \sin \omega(t + \frac{x}{c}), \qquad (2.2)$$

где a – смещение частицы в координате x в момент времени t; A_0- амплитуда волны; ω – круговая частота; $\omega(t \pm \frac{x}{c})$ - фаза колебаний; c – скорость распространения волны.

Результирующая волна

$$a = a_{пад}(x,t) + a_{отр}(x,t) = 2A_0 \sin \frac{x}{c} \cos \omega t \qquad (2.3)$$

Уравнение (2.3) - уравнение стоячей волны. Величина $(2A_0 \sin\omega \frac{x}{c})$ не зависит от времени и является амплитудой стоячей волны. Амплитуда стоячей волны зависит от координаты точки. Иными словами, амплитуды колебания различных точек столба воздуха в цилиндре различны. Точки, в которых амплитуда стоячей волны максимальна, называют пучностями; точки, в которых амплитуда равна нулю, - узлами.

Таким образом, частицы воздуха, находящиеся в узлах стоячей волны, в колебании не участвуют. Так как при отражении от нижнего края сосуда (дна) граничная точка в колебаниях не участвует (отражение происходит от более плотной среды), то в случае возникновения стоячей волны этой точке будет соответствовать узел.

Исходя из данного выше определения узла, из уравнения (2.3) имеем

$$2A_0 \sin\omega \frac{x}{c} \; | = 0. \text{ Откуда } \sin\omega \frac{x}{c} = 0 \qquad (2.4)$$

Это наблюдается (как известно из тригонометрии) при $\omega \frac{x}{c} = \pm к\pi$, где к =0, 1, 2,..., т.е. в тех точках воздушного столба, координата которых равна

$$x = \pm к\pi \frac{c}{\omega} = \pm к \frac{\lambda}{2}, \qquad (2.5)$$

амплитуда колебаний будет равна нулю. Это и будут координаты узлов. Расстояние между соседними узлами

$$\Delta \ell = x_{к+1} - x_к = \frac{\lambda}{2} \qquad (2.6)$$

Следовательно, соседние узлы отстоят друг от друга на расстоянии $\lambda/2$.

Стоячая волна имеет синусоидальную форму. На расстоянии $\lambda/2$ друг от друга расположены неподвижные узловые точки. В интервале между соседними узлами находятся точки, колеблющиеся с различными амплитудами, но в одинаковых фазах, т.е. одновременно достигающие максимума. Форма стоячей волны в различные моменты времени через (1/8) Т показана на рис.2.4.

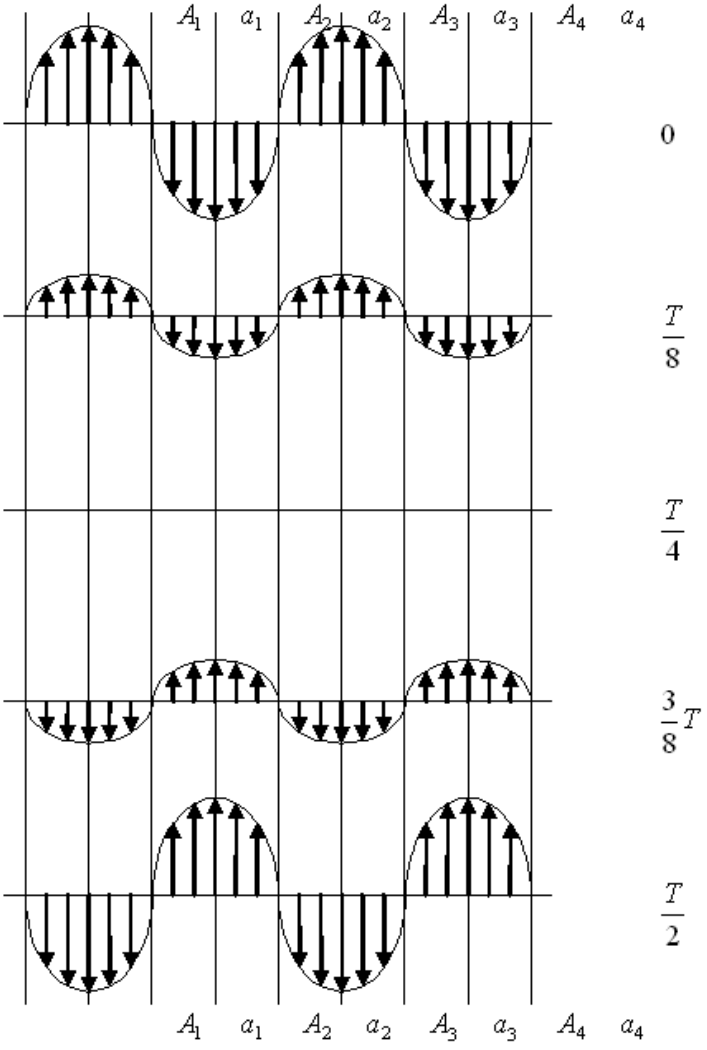


Рис. 2.4.

Точки, лежащие на прямых a_1a_1, a_2a_2 , a_3a_3 , a_4a_4 , -узловые; точки, лежащие на прямых A_1A_1, A_2A_2, A_3A_3, A_4A_4 - пучности. Так как стоячая волна является результатом сложения двух колебаний, идущих в противоположные стороны, то поток энергий,

переносимый в одну сторону, равен потоку энергии, переносимому в другую сторону. Результирующий поток энергии равен нулю, т.е. стоячая волна не переносит энергии. Обычно стоячие волны возникают при распространении упругих колебаний в телах ограниченных размеров. Вследствие многократных отражений от границ тела с окружающей средой падающая волна вызывает множество отраженных волн. В результате взаимодействия падающей и отраженной волны в теле возникают колебания очень сложной формы. Если размеры тела таковы, что волны, взаимодействуя, усиливают друг друга, то амплитуда результирующего колебания возрастает - наступает резонанс.

Пусть длина столба воздуха в цилиндрическом сосуде (рис.2.5) с дном (закрытым одним концом) составит

$$L = n\frac{\lambda}{2}, \tag{2.7}$$

где n - целое число, большее нуля. Расстояние между соседними узлами, как было показано, равно $\lambda/2$, так как у дна (одного закрытого конца) будет узел и длина воздушного столба предполагается равной $\lambda/2$, то и у другого (открытого) конца цилиндрического сосуда (столба воздуха) оказывается узел, и никакого звука мы не слышим.

Если же длина столба воздуха в трубе

$$L = (2n+1)\frac{\lambda}{4} = n\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}, \tag{2.8}$$

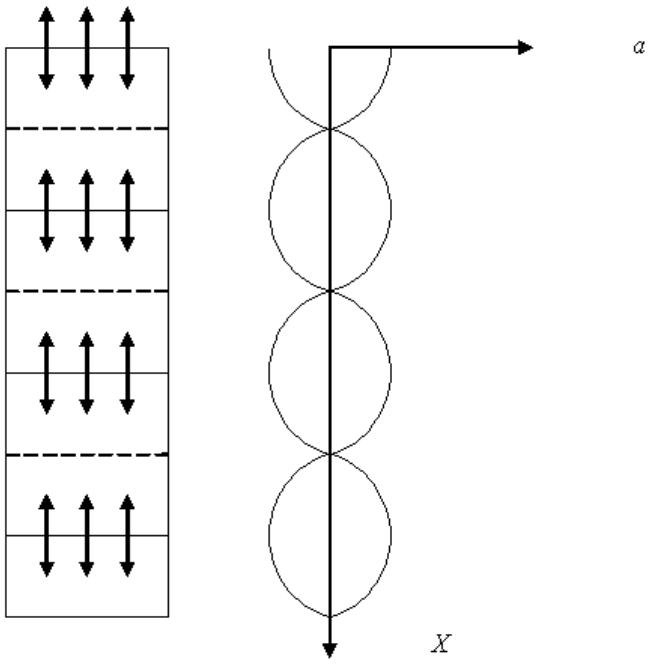


Рис. 2.5

то у верхнего открытого конца цилиндрического сосуда будет находиться пучность (см. рис.2.5). В этом случае в окружающую упругую среду будут распространяться звуковые колебания, амплитуда которых равна амплитуде пучности, и мы услышим усиленный звук. (Сила звука I пропорциональна квадрату амплитуды звуковой волны $I \sim A_0^2$).

Постановка задачи исследования

Поскольку частота волны ν, ее длина λ и скорость C связаны соотношением

$$\lambda = \frac{C}{\nu}, \tag{2.9}$$

то из (5.9) можно определить частоту ν, зная C и λ:

$$\nu = \frac{C}{\lambda} \tag{2.10}$$

Длину волны определяем экспериментально, используя условие (2.6), т.е. тот факт, что расстояние между соседними узлами $\Delta\ell$ (так же, как и расстояние между соседними пучностями $\Delta\ell$) равно $\lambda/2$. Тогда длина волны λ будет равна удвоенному расстоянию между соседними пучностями $\Delta\ell$: $\lambda = 2\Delta\ell$

Учитывая температурную зависимость скорости звука

$$C = C_0\sqrt{\frac{T}{T_0}}, \qquad (2.11)$$

где C_0=332 м/с – скорость звука при температуре T_0=273 К; T - абсолютная температура воздуха.

Перепишем соотношение (2.10) в виде $\nu = \frac{C_0}{2\Delta\ell}\sqrt{\frac{T}{T_0}}$

Это и есть формула для расчета частоты колебаний камертона.

Описание экспериментальной установки

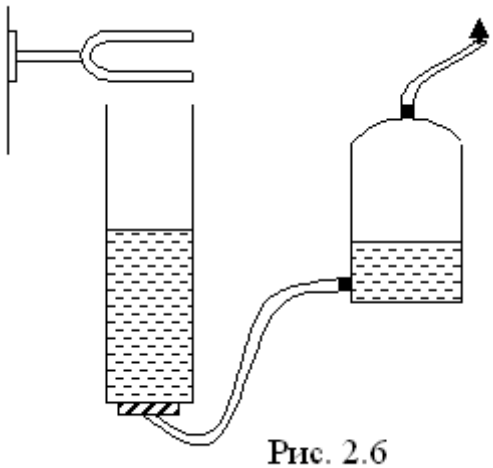


Рис. 2.6

Экспериментальная установка изображена на рис.2.6. Звуковые волны, возбуждаемые колеблющимся камертоном К, распространяются в воздухе. Стеклянная труба А соединена резиновым шлангом с сосудом В заполненным водой. Если уровень воды в трубке таков, что длина воздушного столба удовлетворяет условию (2.8), то в воздушном столбе над водой устанавливается стоячая волна с пучностью у открытого конца и происходит усиление звука, которое и фиксирует экспериментатор. Уровень воды в трубе можно изменять с помощью насоса, которым в сосуд В закачивается воздух.

Порядок выполнения работы

После того как камертон приведен в колебание (с помощью резинового молоточка), постепенно понижая уровень воды в трубе до дна (начиная с положения, когда уровень воды почти совпадает с верхним обрезом стеклянной трубы А), отмечают положение уровня воды, когда наблюдается наиболее громкое звучание (акустический резонанс). Так определяют все последовательные положения резонансных уровней воды. При этом в воздушном столбе над водой всегда выполняется условие (2.8). Опыт повторить 4-5 раз, результаты измерений занести в таблицу. Определить среднее значение $\Delta\bar{\ell}$. Используя расчетную формулу (2.12) и значение $\Delta\bar{\ell}$, рассчитать частоту колебаний камертона ν . Оценить погрешность. Результаты оформить в виде таблицы.

Контрольные вопросы

1. Как происходит движение отдельных частей камертона после удара по его ножке резиновым молоточком?
2. Что такое волна?
3. Какие волны называются продольными? Поперечными?

4. Объясните возникновение стоячих волн. Условия возникновения стоячей волны.

5. Выведите уравнение стоячей волны.

6. Покажите, что расстояние между соседними пучностями равно $\frac{\lambda}{2}$ •

7. Как в данном опыте изменяется фаза звуковой волны при отражении от поверхности волны?

8. Почему стоячая волна не переносит энергию?

Лабораторная работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ КВИНКЕ

Цель работы - изучить один из методов измерения скорости звука.

Необходимое оборудование - стеклянная трубка, резервуар с водой, насос Шинца, звуковой генератор, телефон, масштабная линейка.

Краткие теоретические сведения

Одним из методов определения скорости звука является метод интерференции встречных волн с одинаковой частотой и амплитудой. Представим, что бегущая волна достигает границы данной среды, отражается и распространяется в обратном направлении, складываясь с падающей волной, - образуется стоячая волна.

Уравнение распространяющейся в положительном направлении оси X волны имеет вид

$$y_{пад} = a_o \cos\omega(t - \frac{x}{c}) = a_o \cos 2\pi(\nu t - \frac{x}{\lambda}), \qquad (3.1)$$

где $y_{пад}$ - смещение точки среды от положения равновесия в момент времени t; a_o- амплитуда волны; ϖ - циклическая частота, связанная с линейной частотой соотношением $\omega = 2\pi\nu$; x – координата; c – скорость распространения волны, связанная с длиной волны и частотой соотношением $c = \frac{\lambda}{T}$.

Уравнение отраженной волны, распространяющейся в направлении, противоположном направлению положительного отсчета x, имеет вид

$$y_{отр} = a_o \cos\omega(t + \frac{x}{c}) = a_o \cos 2\pi(\nu t + \frac{x}{\lambda}) \qquad (3.2)$$

Результирующее смещение *y* колеблющейся точки является результатом суммирования смещений $y_{пад}$ и $y_{отр}$:

$$y_{пад}+y_{отр}=2a_0\cos(2\pi\frac{x}{\lambda})\cos 2\pi\nu t = 2a_o \cos(2\pi\frac{x}{\lambda})\cos\omega t \qquad (3.3)$$

Из уравнения (3.3) видно, что некоторая точка, имеющая координату x, совершает гармоническое колебание с амплитудой $A = 2a_o\cos(2\pi\frac{x}{\lambda})$ и с фазой $2\pi\nu t$.

В точках, координаты x которых удовлетворяют соотношению $\cos\frac{2\pi x}{\lambda}$, амплитуда колебаний в любой момент времени равна нулю. Такие точки называют узлами. В эти точки падающая и отраженная волны приходят в противоположных фазах. В точках, где $\cos\frac{2\pi x}{\lambda}=0$, амплитуда колебаний имеет максимум. Такие точки называются пучностями.

Решая тригонометрическое уравнение $\cos\frac{2\pi x}{\lambda}=0$, найдем координаты узлов:

$$2\pi\frac{x_{уз}}{\lambda}=\pm(2n+1)\frac{\pi}{2};$$

$$x_{n,уз}=\pm(2n+1)\frac{\lambda}{4} \qquad (3.4)$$

Расстояние между соседними узлами

$$\Delta x_{уз}=x_{n+1,уз}-x_{n,уз}=\frac{\lambda}{2}$$

Решая аналогично тригонометрическое уравнение $\cos 2\pi\frac{x}{\lambda}=1$, найдем координаты пучностей:

$$x_{n,пуч}=\frac{n\lambda}{2}.$$

Расстояние между соседними пучностями

$$\Delta x_{пуч}=x_{n+1,пуч}-x_{n,пуч}=\frac{\lambda}{2} \qquad (3.5)$$

Как следует из (6.5), расстояние между соседними пучностями также равно $\frac{\lambda}{2}$. Из (3.4) и (6.5) видно, что расстояние между соседними узлами и пучностями

$$\Delta x_{уз}=x_{n,уз}-x_{n,пуч}=\frac{\lambda}{4}$$

Обоснование метода и вывод расчетной формулы

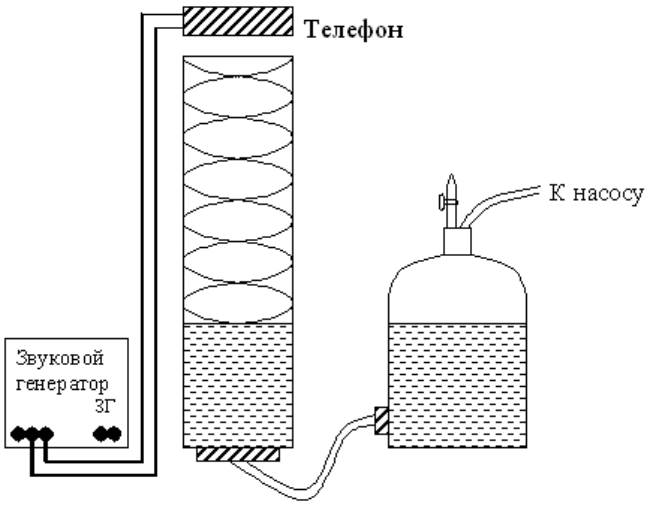


Рис. 3.1

Экспериментальная установка изображена на рис.3.1.

Стеклянная трубка А соединена с резервуаром Б, заполненным водой. Кран К служит для сообщения воздуха в резервуаре с атмосферой. У верхнего открытого конца трубки укреплен телефон Т, подсоединенный к выходу звукового генератора ЗГ. С помощью насоса Н при закрытом кране К воду из резервуара Б перекачивают в трубку А. Волна, идущая от мембраны телефона, и волна, отраженная от поверхности воды, интерферируют в столбе воздуха над водой. Образуется стоячая волна.

Если высота столба воздуха в трубке такова, что на ней укладывается нечетное число четвертой длины волны $\frac{\lambda}{4}$, то расположение узлов и пучностей таково, что первый узел находится у поверхности воды, а последняя пучность - у открытого конца трубки. В

этот момент наблюдается наиболее интенсивное звучание, так как сила звука пропорциональна квадрату амплитуды волны. При изменении уровня воды в трубке максимум сменяется минимумом звучания. В этом случае в столбе воздуха над водой укладывается четное число четвертой волны и у открытого конца трубки находится узел.

Отмечая на трубке положение уровня воды, соответствующее максимумам звучания, и измеряя затем линейкой расстояния между ними, находим расстояние ℓ между двумя соседними максимумами. В соотношении (3.5) мы показали, что это расстояние равно половине длины волны. Таким образом, можно по результатам измерений ℓ рассчитать длину волны $\lambda = 2\ell$.

Зная длину звуковой волны λ и частоту колебаний мембраны телефона, заданную генератором, можно определить фазовую скорость распространения звуковой волны в воздухе: $\vartheta = \lambda\nu = 2\nu\ell$.

Порядок выполнения работы

1. Продумать опыт, составить таблицу для занесения экспериментальных и расчетных данных.
2. Собрать экспериментальную установку согласно рис.3.1.
3. С разрешения преподавателя или лаборанта включить генератор звуковых колебаний.
4. Задать частоту колебаний в интервале 900...2000 Гц.
5. Закрыть кран К .
6. Накачивать воздух в резервуар Б до тех пор, пока уровень воды в трубке А не окажется на 4...5 см ниже открытого края трубки.
7. Приоткрыть кран К настолько, чтобы вода медленно вытекала из трубки А .
8. Отметить на трубке уровни воды, при которых резко усиливается звучание.
9. Измерить линейкой расстояние между, точками ℓ_i и вычислить среднеарифметическое значение ℓ_i.
10. По формуле (3.6) вычислить фазовую скорость распространения звука ϑ.
11. С помощью генератора изменить частоту колебаний мембраны.
12. Повторить пп.5-10.
13. Вычислить среднюю скорость звука и рассчитать погрешности измерений.
14. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Контрольные вопросы

1. Объяснить механизм распространения звуковых волн в воздухе.
2. Вывести уравнение стоячей волны.
3. Вывести условия узлов и пучностей стоячей волны и их координаты .
4. Вывести уравнение (3.6).
5. Почему у поверхности воды всегда образуется узел стоячей волны?

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО СТОКСУ

Цель работы - изучить характер падения шарика в вязкой среде; определить коэффициент вязкости жидкости методом Стокса.

Необходимое оборудование - экспериментальная установка, секундомер, отсчетный микроскоп, металлические шарики.

Краткие теоретические сведения

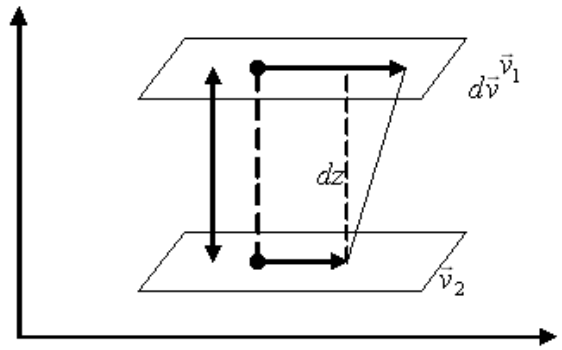


Рис.4.1

При движении жидкости между ее слоями возникают силы внутреннего (вязкого) трения, действующие таким образом, чтобы уравнять скорости всех слоев. Природа этих сил заключается в том, что слои, двигаясь с разными скоростями, обмениваются молекулами. Молекулы из быстро движущегося слоя передают молекулам медленно движущегося слоя некоторый импульс, вследствие чего этот слой начинает двигаться быстрее. Естественно, что при этом движение быстро двигавшегося слоя тормозится.

Рассмотрим жидкость, движущуюся в направлении оси X (рис.4.1). Пусть слои жидкости движутся с разными скоростями.

На оси *z* возьмем две точки, находящиеся на расстоянии *dz*. Скорость потока отличается в этих точках на величину dυ. Отношение $\frac{d\upsilon}{dz}$ характеризует изменение скорости потока в направлении оси *z* и называется градиентом скорости.

Сила внутреннего трения, действующая между двумя слоями, пропорциональна площади их соприкосновения ΔS , градиенту скорости $\frac{d\upsilon}{dz}$:

$$f = \eta \frac{d\upsilon}{dz} \Delta S \qquad (4.1)$$

Величина η называется коэффициентом внутреннего трения или коэффициентом динамической вязкости (величина φ, обратная η , называется текучестью).

Если в формуле (4.1) положить численно $\frac{d\upsilon}{dz}$=I и ΔS=I, то $\eta = f$ т.е. <u>коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, возникающей на каждой единице поверхности соприкосновения двух слоев, движущихся относительно друг друга с градиентом скорости, равным единице.</u>

Размерность в СИ: $[\eta] = кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-1} = Па \cdot с$.

Коэффициент динамической вязкости зависит от природы жидкости и для данной жидкости с повышением температуры уменьшается. Вязкость играет существенную роль при движении жидкости. Слой жидкости, непосредственно прилегающий к твердой поверхности, в результате прилипания остается неподвижным относительно нее. Скорость остальных слоев возрастает по мере удаления от твердой поверхности .

<u>Примечание</u>. Наряду с коэффициентом динамической вязкости η часто употребляют коэффициент кинематической вязкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

где ρ - плотность жидкости. Размерность в СИ: [ν] = $м^2с$.

Метод Стокса

На движущийся в жидкости шарик действует сила вязкого трения f , тормозящая его движение (рис.4.2). При условии, что стенки сосуда находятся далеко от шарика, сила эта по закону Стокса

$$f = 6\pi\eta r\upsilon,$$

где r – радиус шарика, υ - скорость шарика.

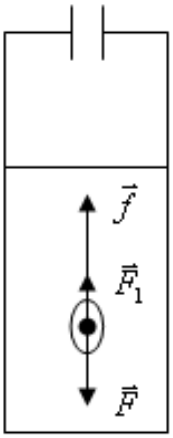


Рис. 4.2.

Кроме силы трения $\bar{f}$, тормозящей шарик, на него будут действовать также сила тяжести F=mg=ρVg и выталкивающая сила F_1 =ρ_1Vg , равная весу жидкости в объеме шарика (V – объем шарика, ρ - плотность шарика, ρ_1 - плотность жидкости).

На основании второго закона Ньютона

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = \rho Vg - \rho_1 Vg - 6\pi\eta r\upsilon .$$

Решение полученного уравнения:

$$\upsilon = \frac{Vg(\rho-\rho_1)}{6\pi\eta r}\left[1-\ell^{-\frac{6\pi r\eta}{m}t}\right] \qquad (4.2)$$

в чем можно убедиться непосредственной перестановкой.

Поскольку с течением времени величина $\ell^{-\frac{6\pi r\eta}{m}t}$ очень быстро убывает, то скорость шарика вначале возрастает, но через малый промежуток времени становится величиной постоянной:

$$\upsilon_0 = \frac{Vg(\rho-\rho_1)}{6\pi r\eta} \qquad (4.3)$$

Здесь $V=\frac{4}{3}\pi r^3$ - объем шарика.

Скорость шарика можно определить, зная расстояние между метками на сосуде и время t , за которое шарик проходит это расстояние: $\upsilon_0 = \frac{L}{t}$. Тогда из выражения (4.3) следует, что коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(\rho-\rho_1)r^2gt}{L} \qquad (4.4)$$

Для нахождения η измеряют r, L, t.

Порядок выполнения работы

1. Измерить с помощью отсчетного микроскопа диаметры пяти свинцовых шариков.

Замечание. Свинцовые шарики, используемые в работе, не являются идеальными сферами, поэтому диаметр одного и того же шарика следует измерить в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определить среднеарифметическое значение.

2. На сосуде с исследуемой жидкостью нанести метки A и A′ и измерить расстояние L между ними. Расстояние от метки A до верхнего края сосуда должно быть не меньше 5...7 см (подумайте, почему, и дайте ответ).

3. Осторожно опустите шарик сквозь стеклянную рубку в сосуд с глицерином.

4. В момент прохождения метки A′ включить секундомер.
5. При прохождении шариком метки A′ остановить секундомер.
6. Определить по секундомеру время t, за которое шарик прошел путь, равный L .
7. Опыт по пп.3-6 проделать для пяти шариков.
8. Выписать из таблицы значения плотностей глицерина ρ_1 и свинца ρ .
9. По данным каждого опыта вычислить коэффициент вязкости глицерина η_i .
10. Для исследуемой жидкости вычислить коэффициент вязкости, как среднеарифметическое значение η_i .Вычислить погрешность полученного значения вязкости глицерина.
11. Результаты всех измерений и вычислений занести в таблицу.

Контрольные вопросы

1. Записать формулу для силы сопротивления, возникающей при движении шарика малых размеров в вязкой жидкости (формула Стокса).
2. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкость?
3. Проанализируйте характер движения шарика внутри жидкости.
4. При каких условиях тело движется прямолинейно и равномерно?
5. Как определить диаметр шарика?
6.Запишите расчетную формулу для определения коэффициента вязкости жидкости.
7. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости в СИ?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПО ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЯ

Цель работы – изучить статический метод определения модуля Юнга.

Необходимое оборудование - стальная проволока, микрометр, отсчетный микроскоп, грузы.

Краткие теоретические сведения

Один из типов упругих деформаций – деформация растяжения, характеризующаяся нормальным напряжением $\sigma_н$.

Нормальное напряжение – это физическая величина, которая численно равна упругой силе $\Delta F_н$, приходящейся на единицу площади поперечного сечения тела, перпендикулярного к направлению действия этой силы:

$$\sigma_н = \frac{\Delta F_н}{\Delta S}$$

В соответствии с законом Гука относительная деформация упруго деформированного тела $\Delta\ell/\ell$ прямо пропорциональна напряжению, то есть

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = \alpha \frac{F_H}{S}, \qquad (5.1)$$

где α – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом упругости (зависит от материала, из которого изготовлено исследуемое тело). Закон Гука справедлив лишь для достаточно малых относительных деформаций, то есть таких, при которых не превзойден предел упругости.

Величина *к*, обратная коэффициенту упругости α (*к=1/α),*называется модулем упругости. В зависимости от вида деформации модуль упругости имеет разные названия,

назначения и числовые значения. При деформации растяжения он получил название модуля Юнга: E=1/α

Закон Гука (5.1) для деформации растяжения в соответствии с этим будет выглядеть так:

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F_H}{S} \qquad \text{или} \qquad \sigma = E\frac{\Delta\ell}{\ell} \tag{5.2}$$

Из (5.2) видно, что модуль Юнга равен напряжению, при котором абсолютное удлинение тела $\Delta\ell$ равно его начальной длине ℓ (то есть при относительном удлинении, равном единице: $\Delta\ell/\ell=1$).

Если тело имеет цилиндрическую форму диаметром d, то площадь его поперечного сечения $S=\pi d^2/4$, то есть

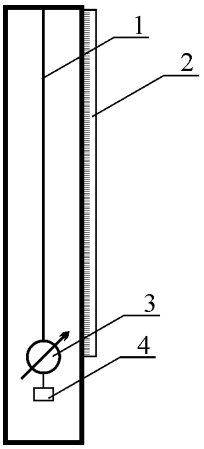
$$\mathrm{E} = \frac{4P\ell}{\pi d^2 \Delta\ell}, \tag{5.3}$$

где P – вес груза ($P=mg$).

Формула (5.3) – расчетная для определения модуля Юнга по деформации удлинения. Схема прибора для определения модуля Юнга показана на рис.5.1.

Описание установки

Стальная проволока 1 растягивается под действием переменных грузов 4 (рис. 5.1). Длина проволоки l измеряется линейкой 2, ее диаметр d – микрометром, абсолютное удлинение Δl – индикатором 3.



Порядок выполнения работы

1. Проверить установку, убедиться, что она готова к работе и пребывает под начальной нагрузкой m_0.
2. Определить, какие величины в ходе работы будут измеряться, а какие будут рассчитываться. В соответствии с этим составить таблицу, в которую будут заноситься экспериментальные и расчетные данные (табл. 5.1, 5.2).
3. Микрометром измерить в нескольких местах в разных направлениях диаметр проволоки. Значения d занести в таблицу 5.1, вычислить среднее значение диаметра $\bar{d}$.

Рис. 5.1 Установка для измерения модуля Юнга стальной проволоки

Таблица 5.1
Диаметр проволоки

№ п/п	d, м	$\bar{d}$, м
1 2 3		

Таблица 5.2
Экспериментальные данные для расчета модуля Юнга

п/п	,кг	$\sigma = \frac{4mg}{\pi d^2}$	ℓ'	ℓ''	$\Delta\bar{\ell} = \frac{\Delta\ell' + \Delta\ell}{2}$	$\frac{\Delta\bar{\ell}}{\ell}$	E,Н/м^2	$\bar{E}$,Н/м^2	,%

4. Масштабной линейкой измерить длину исследуемой проволоки.

5. Нагрузить проволоку одним грузом и измерить удлинение $\Delta\ell'$, затем добавить второй груз, снова измерить $\Delta\ell'$ и т.д. для 5–6 различных нагрузок.

6. Разгружая проволоку постепенно по одному грузу, записать соответствующие удлинения $\Delta\ell''$.

7. Среднее значение удлинения определить по формуле

$$\Delta\bar{\ell} = \frac{\Delta\ell' + \Delta\ell''}{2}$$

8. По формуле (11.3) вычислить модуль Юнга, оценить погрешность.

9. Построить на миллиметровке график зависимости $\sigma_н = f(\frac{\Delta\bar{\ell}}{\ell})$.

Проанализировать характер зависимости $\sigma_н = f(\frac{\Delta\bar{\ell}}{\ell})$. Сделать выводы о справедливости закона Гука.

Контрольные вопросы

1. Что называется деформацией тела? Назовите виды деформаций.
2. Чем обусловлено возникновение деформаций?
3. Сформулируйте закон Гука.
4. Как определить деформацию при наличии нескольких внешних воздействий?
5. Дайте определение модуля Юнга. В каких единицах измеряется эта величина?
6. Как определить абсолютное удлинение проволоки, вызванное различными нагрузками?
7. С какой целью следует сравнивать положения отсчетного волоска при увеличении нагрузки и после разгрузки?
8. Запишите расчетную формулу для определения модуля Юнга.
9. Что понимают под пределом упругости?

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы - изучить метод определения напряженности гравитационного поля с помощью математического маятника.

Необходимое оборудование: математический маятник, секундомер, масштабная линейка.

Краткие теоретические сведения

Для характеристики силовых полей вводится понятия напряженности поля, которое является его силовой характеристикой. Напряженностью гравитационного поля называется физическая величина равная силе, действующей со стороны поля на единичную массу, помещенную в это поле, т.е.

$$\frac{\vec{F}}{m} = \frac{m\vec{g}}{m} = \vec{g} \qquad (6.1)$$

Из соотношения (6.1) следует, что напряженностью гравитационного поля является вектор ускорения свободного падения тел в поле сил тяготения. Один из методов определения ускорения свободного падения, т.е. напряженности гравитационного поля, - метод математического маятника.

Рассмотрим колебания математического маятника, представляющего собой невесомую нерастяжимую нить, к которой подвешено тело, которое можно считать материальной точкой. На отклоненное от положения равновесия тело маятника (рис.6.1) действует сила тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$, где m - масса тела, g - ускорение свободного падения. Разложим силу $\vec{F}$ _на две составляющие: $\vec{Q}$ - в направлении натянутой нити; $\vec{R}$ - перпендикулярно к нити. Действие составляющей $\vec{Q}$ компенсируется действием силы натяжения нити $\vec{N}$, их равнодействующая - равна пулю. Сила $\vec{R}$ направлена к положению равновесия и будет стремиться возвратить маятник в положение равновесия.

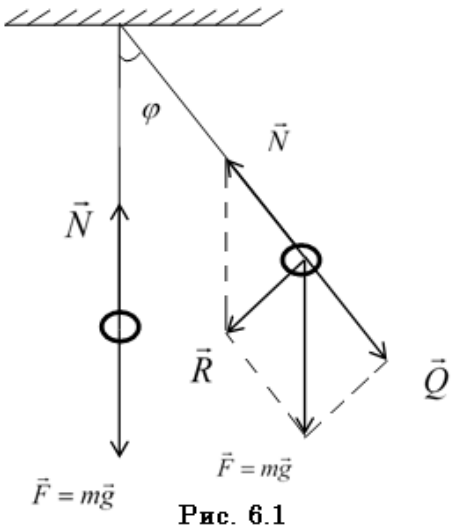


Рис. 6.1

Из рис.6.1 видно, что

$$R = mg\sin\varphi,$$

где φ - угол отклонения маятника от положения равновесия.

Таким образом, модуль силы $\vec{R}$ зависит от угле отклонения маятника и будет изменяться от нуля в положении равновесия ($\varphi = 0$) до максимума при крайних правом и левом положениях маятника.

Возвращающая сила $\vec{R}$ создает вращающий момент:

$$M = -mg\ell\sin\varphi, \qquad (6.3)$$

где ℓ - длина маятника. Знак " - " указывает на то. что момент М и угловое смещение φ имеют противоположные направления.

Запишем для маятника уравнение динамики вращательного движения в проекции на направление перпендикулярное плоскости рис. 6.1:

$$m\ell^2\frac{d^2\varphi}{dt^2} = mg\ell\sin\varphi \ , \qquad (6.4)$$

которое можно привести к виду

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{g}{\ell}\sin\varphi = 0 \qquad (6.5)$$

Ограничимся рассмотрением малых отклонений. В этом случае можно положить $\sin\varphi \approx \varphi$. Введя обозначение

$$\frac{g}{\ell} = \omega^2, \tag{6.6}$$

придём к уравнению

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0{}^2\varphi = 0. \tag{6.7}$$

Его решение имеет вид

$$\varphi = a\cos(\omega_0 t + \alpha). \tag{6.8}$$

Следовательно, при малых φ угловое отклонение математического маятника изменяется со временем по гармоническому закону.

Как следует из (6.6), частота колебаний математического маятника зависит только от длины маятника и ускорения силы свободного падения. По формуле $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ с учетом (6.6) получается выражение для периода колебаний математического маятника (формула Гюйгенса):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}. \tag{6.9}$$

Точное решение уравнения (27.5) дает формулу для периода колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}[1 + (\frac{1}{2})^2\sin^2\frac{\varphi}{2} + (\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{4})^2\sin^4\frac{\varphi}{2} + \cdots],$$

где φ - максимальное отклонение маятника от положения равновесия (амплитуда).

Обоснование метода и вывод расчетной формулы

Для осуществления на практике модели математического маятника к концу нити подвешивают тяжелый металлический шарик. Если диаметр шарика мал по сравнению с длиной нити, а масса его намного больше массы нити, то период колебаний такого маятника будет равен периоду колебаний математического маятника такой же длины.

Длина маятника равна расстоянию от точки подвеса до центра тяжести шарика. Непосредственное измерение длины маятника затруднительно, так как приходится определять положение центра тяжести шарика. Поэтому поступают следующим образом: нить маятника закрепляют на подвесе так, чтобы маятник устанавливался против какого-либо уровня на масштабной линейке, и определяют период колебаний T_1 при данной длине маятника.

Период колебаний - это время одного полного колебания, поэтому измерив время t_1 полных n_1 колебаний, можем рассчитать:

$$T_1 = \frac{t_1}{n_1}. \tag{6.10}$$

С другой стороны, теория дает для периода T_1 соотношение (6.9), которое в этом случае записывается так:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{\ell_1}{g}}. \tag{6.11}$$

Изменив длину маятника до величины ℓ_2, можем определить период колебаний маятника с длиной нити ℓ_2:

$$T_2 = \frac{t_2}{n_2}, \qquad (6.12)$$

где t_2 -время полных n_2 колебаний.

Соотношение (27.9) в этом случае будет иметь вид

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{\ell_2}{g}}. \qquad (6.13)$$

Возведя в квадрат правые и левые части уравнений (6.11) и (6.13), а затем вычтя из (6.13) уравнение (6.11), получим

$$T_2^{\,2} - T_1^2 = \frac{4\pi^2(\ell_2 - \ell_1)}{g},$$

откуда следует расчетная формула для определения напряженности гравитационного поля Земли:

$$g = \frac{4\pi^2(\ell_2 - \ell_1)}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad (6.14)$$

Эта формула удобна тем, что для расчета g не нужно располагать значениями ℓ_1 и ℓ_2, а достаточно знать их разность $\ell_1 - \ell_2$, что гораздо легче для экспериментального измерения и точнее для определения g.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу, куда будут заноситься измеренные и расчетные величины.
2. Установить маятник в положение с длиной нити ℓ_1.
3. Вывести маятник из положения равновесия. Так как формула (6.9) справедлива только пря малых амплитудах, то маятник следует отклонять от положения равновесия на 1…2 см.
4. Измерить секундомером время t_1 , в течение которого маятник совершает 100 полных колебаний.
5. Вычислить период колебаний маятника по формуле (6.9).
6. Повторить действия согласно пп. 2-5 еще 3-4 раза.
7. Изменить длину нити до величины ℓ_2.
8. Проделать действия согласно пп. 3-6 и получить 3-4 значения периода колебаний T_2.
9. Вычислить напряженность гравитационного поля Земли по формуле (6.14).
10. Рассчитать абсолютную и относительную погрешность g.
11. Результаты измерений занести в таблицу.

Контрольные вопросы

1. Что называется математическим маятником? Чем он отличается от физического?
2. Запишите формулу для определения периода колебаний математического маятника.
3. Почему формулу $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$. можно использовать только в случае, когда амплитуде колебаний маятника достаточно мала?
4. Поясните метод и выведите формулу (6.14).

5. Запишите расчетную формулу для определения ускорения свободного падения , если разность длин математического маятника равна 0,5;| 0,25 м.
6. Как зависит ускорение свободного падения от широты местности ? Почему?
7. Какие факторы влияют на величину g ?

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы - измерить коэффициент поверхностного натяжения спирта методом отрыва капель.

Необходимое оборудование - штатив, бюретка с краном, стакан лабораторный, спирт, вода.

Краткие теоретические сведения

Наличие у тел свободной поверхности приводит к существованию поверхностных явлений. Молекула, находящаяся на поверхности жидкости, испытывает действие результирующей силы межмолекулярного притяжения со стороны молекул, находящихся внутри жидкости. В результате молекулы из поверхностного слоя стремятся переместиться вглубь жидкости, а их количество в поверхностном слое становится минимально возможным. В поверхностном слое возникают силы поверхностного натяжения. *Силой поверхностного натяжения* называют силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить ее до минимума

$$F = \sigma L , \tag{7.1}$$

где L - длина границы поверхностного слоя жидкости, σ – коэффициент ее поверхностного натяжения, зависящий от природы граничащих сред и температуры.

Метод выполнения работы. При отрыве капли от поверхности стеклянной трубки сила тяжести F_T несколько больше силы поверхностного натяжения F. Для расчетов будем их считать приближенно равными

$$F = F_T . \tag{7.2}$$

Поскольку $F = \sigma l$, а $F_T = mg$, получим

$$\sigma l = mg , \tag{7.3}$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости, l - длина окружности шейки капли в месте отрыва, m – масса капли. Зная, что $l = 2\pi r$ и $m = \rho V$, имеем

$$2\pi r\sigma = \rho g V , \tag{7.4}$$

где r - радиус шейки капли, V - объем капли, ρ - плотность жидкости.

Пусть некоторый объем жидкости содержит n_1 капель одной жидкости и n_2 капель другой. Умножив (7.4) сначала на n_1 , а затем на n_2 получим два уравнения для двух жидкостей. Разделив полученные уравнения друг на друга, имеем

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{n_1\sigma_1}{n_2\sigma_2} , \tag{7.5}$$

откуда коэффициент поверхностного натяжения второй жидкости

$$\sigma_1 = \frac{n_2\sigma_2\rho_1}{n_1\rho_2} . \tag{7.6}$$

Порядок выполнения работы

1. Налейте спирт в бюретку. Откройте кран и добейтесь его медленного капания. Выберите объем V не менее 3 мл. V = _____.
2. Подсчитайте количество капель спирта n_1 в выбранном объеме – их число должно быть не менее 200 (табл. 7.1).
3. Повторите п. 2 дважды (табл. 7.1).
4. Промойте бюретку дистиллированной водой. (табл. 7.1).
5. Налейте в бюретку дистиллированную воду. Откройте кран и добейтесь ее медленного капания.
6. Подсчитайте количество капель воды n_2 в том же объеме V (табл. 7.1).
7. Повторите п. 6 дважды (табл. 7.1).
8. По формуле (7.6) рассчитайте три значения коэффициента поверхностного натяжения спирта σ_1 (табл. 7.1). Коэффициент поверхностного натяжения воды σ_2, плотности воды ρ_2 и спирта ρ_1 возьмите из справочных материалов.
9. Вычислите среднее значение коэффициента поверхностного натяжения спирта $\bar{\sigma}_1$ (табл. 7.1).
10. Найдите отклонение от среднего значения как $\Delta\sigma_1 = |\sigma_1 - \bar{\sigma}_1|$. Получите среднее значение отклонения $\Delta\bar{\sigma}_1$ (табл. 7.1).
11. Вычислите относительную погрешность измерений как $\varepsilon = \frac{\Delta\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_1} \cdot 100\%$ (табл. 7.1).

Таблица 7.1

N опыта	n_1	n_2	σ_1, Н/м	$\bar{\sigma}_1$, Н/м	$\Delta\sigma_1$, Н/м	$\Delta\bar{\sigma}_1$, Н/м	ε, %

Контрольные вопросы

1. Объяснить явление поверхностного натяжения жидкости с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
2. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения жидкости?
3. От каких факторов зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкости?
4. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения от температуры? Ответ обоснуйте.

Лабораторная работа №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы - определить коэффициент линейного расширения твердых тел. Приобрести навыки работы с индикатором малых перемещений.

Необходимое оборудование - прибор для определения линейного расширения твердых тел, стержневые образцы — стеклянный, алюминиевый, стальной, пробирки, штатив для пробирок, термометр, индикатор малых перемещений.

Краткие теоретические сведения

Опытным путем установлено, что все вещества при нагревании изменяют свои размеры. При этом, как правило, они расширяются. Однако некоторые вещества в некотором температурном интервале являют собой исключение из этого правила (например, вода при увеличении температуры от 0 ^{0}C до 40^{0}C уменьшает свой объем. Коэффициент объемного расширения воды в указанном интервале температур — отрицательный. Окись кремния при нагревании от 4 К до 100 К также уменьшает свои линейные размеры. Коэффициент линейного расширения - отрицательный).

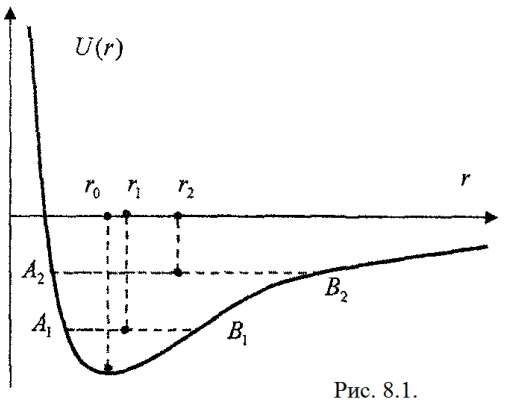


Рис. 8.1.

Молекулярно-кинетическая теория вещества объясняет тепловое расширение тел увеличением средних расстояний между молекулами, Причина увеличения межмолекулярных расстояний при повышении температуры состоит в конкуренции потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия и кинетической энергии теплового (хаотического) движения частиц вещества (атомов, молекул). Это утверждение можно проиллюстрировать, рассмотрев график зависимости потенциальной энергии взаимодействия частиц от расстояния между ними (рис.8.1).

На рис. 8.1 r_0 — это межмолекулярное расстояние, при котором (U(r_0) принимает минимальное значение. При очень низких температурах колебания атомов происходят вокруг r_0 у «дна» потенциальной ямы. При очень низких температурах отклонение атомов (частиц) от положения равновесия r_0 «вправо» и «влево» практически одинаково (асимметричность потенциальной ямы практически не проявляется). Поэтому центр колебаний (положение равновесия) находится в точке r_0. С повышением температуры энергия теплового движения ε возрастает, а, следовательно, увеличивается амплитуда колебаний A~$\sqrt{\varepsilon}$. При повышении температуры тела до значения T_1 частица может совершать колебания в интервале расстояний от A_1 до B_1. (В точках A_1 и B_1 потенциальная энергия равна кинетической энергии частицы). Вследствие асимметричности потенциальной ямы положение равновесия частицы, соответствующее середине отрезка A_1B_1 окажется на расстоянии $r_1 \rangle r_0$. Аналогично при температуре $T_2 > T_1$ равновесное среднее расстояние между частицами станет $r_2 \rangle r_1$ и т.д. Таким образом, с повышением температуры положение равновесия, относительно которого совершаются колебания частиц, смещается в область более далеких межмолекулярных расстояний. Среднее расстояние между частицами увеличивается тело расширяется.

Чтобы сравнить способность различных веществ к линейному расширению вводится так называемый средний (в интервале температур T_1, T_2) коэффициент линейного расширения:

$$\beta = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}. \qquad (8.1)$$

Средний коэффициент линейного расширения (8.1) показывает относительное изменение линейных размеров тела $\frac{\Delta L}{L} = \frac{L_2 - L_1}{L_1}$ при изменении температуры на один Кельвин ($\Delta T = T_2 - T_1 = 1K$).

Истинный коэффициент линейного расширения (коэффициент линейного расширения при данной температуре) определяется дифференциальным соотношением:

$$\alpha = \frac{dL}{L \cdot dT}. \tag{8.1a}$$

Коэффициент линейного расширения, как это следует из (8.1) или (8.1а), измеряется в K^{-1}.

Из (8.1а) следует:

$$\alpha \cdot dT = \frac{dL}{L}.$$

Проинтегрировав, получим:

$$\alpha \cdot \int_0^T dT = \int_{L_0}^{L} \frac{dL}{L} \quad \Rightarrow \quad \alpha \cdot T = \ln L - \ln L_0 \quad \Rightarrow \quad \alpha \cdot T = \ln \frac{L}{L_0}, \tag{8.2}$$

где L - длина тела при температуре Т;

L_0 - длина тела при T_0 =0 К.

Из (8.2) следует:

$$\frac{L}{L_0} = e^{\alpha \cdot T} \quad \Rightarrow \quad L = L_0 \cdot e^{\alpha \cdot T}. \tag{8.3}$$

Так как для твердых тел α имеет величину порядка $10^{-5} K^{-1}$, то даже при температуре Т = 100 ^{0}С = 373 К, α Т будет значительно меньше единицы α Т«1. Тогда, $e^{\alpha T}$ =1+ αT, и

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T). \tag{8.4}$$

Поскольку длину тела L_0 при T_0=0 К определить невозможно, то можно записать уравнение (8.4) для разных температур T_1 и T_2, а затем разделить первое уравнение на второе:

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1 \cdot (T_2 - T_1)}, \tag{8.5}$$

где L_1 - длина тела при температуре T_1,

L_2 - длина тела при температуре T_2.

Формула (8.5) может быть использована для экспериментального определения α.

Описание экспериментальной установки

Прибор (рис.8.2) состоит из корпуса, к которому крепится защитный кожух. Внутри кожуха установлен нагреватель 1. В нагреватель помещается стеклянная пробирка 3 с водой и исследуемым стержнем 4. Резиновая прокладка 2 предназначена для защиты наружных частей прибора от водяных паров. На корпусе прибора установлена стойка с поворотным кронштейном 5 для крепления индикатора малых перемещений б. На панели

корпуса расположены индикаторная лампа и кнопочный выключатель. Исследуемый образец, нагревается от воды в пробирке. Изменение длины образца измеряется индикатором малых перемещений.

Если в начальном положении стрелка индикатора совпадает с нулевой меткой $L_1 = 0$, а в конечном со значением L_2, то удлинение образца $\Delta L = L_2 - L_1 = L_2 - 0 = L_2$.

Порядок выполнения работы

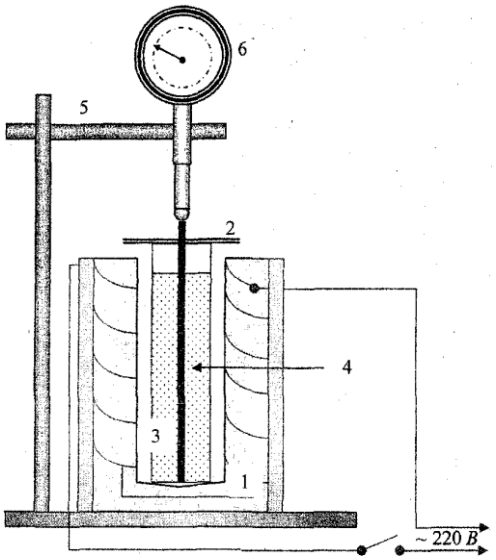


Рис. 8.2

1. Заполнить пробирки водой комнатной температуры на $1/2$ объема.

Опустить в каждую пробирку по испытуемому стержню. При этом сферический конец стержня должен быть внизу, а конец с углублением — вверху. Все пробирки разместить на предназначенном для них штативе.

2. В поворотный кронштейн вставить индикатор малых перемещений и отвести (повернуть) его в сторону на четверть оборота (до упора).

3. Лабораторным термометром измерить температуру воды в одной из пробирок (извлекал стержень при этом).

4. Пробирку с испытуемым стержнем вставить (через резиновую прокладку) в отверстие нагревателя.

5. Приподняв шток индикатора малых перемещений вверх, установить индикатор над пробиркой. Затем опустить шток в углубление на торце стержня.

6. Вращением круговой шкалы индикатора выставить ее в положение, чтобы «нулевое деление» совпадало с положением стрелки индикатора.

7. Штепсельную вилку прибора вставить в розетку 220 В. Включить питание прибора кнопочным выключателем. (При этом загорается сигнальная лампочка прибора).

8. После закипания воды в пробирке снять показания индикатора малых перемещений $\Delta L = L_2 - L_1$.

9. Выключить питание прибора.

10. Приподняв шток индикатора отвести в сторону до упора.

11. Повторить аналогичные измерения с другими образцами.

ПРИМЕЧАНИЕ. Дальнейшие измерения продолжаются с уже нагретым прибором. Поэтому, поместив новый образец в приборе, надо выставить индикатор перемещений в пулевое положение достаточно быстро, чтобы образец не успел нагреться.

12. Рассчитать коэффициент линейного расширения по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_1 \cdot (T_2 - T_1)}. \qquad (8.6)$$

Приняв $L_1 = 160\,\text{см}$.

13. Опыты повторить несколько раз. Результаты измерений завести в таблицу.

14. Оценить погрешность полученных значений α.

Таблица 8.1

Экспериментальные и расчетные данные опытов по определению коэффициента линейного расширения твердых тел

№	Вещество	T_1, K	T_2, K	$\Delta L, \cdot 10^{-3}$ $м$	α, K^{-1}
1					

Контрольные вопросы

1. Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории тепловое расширение тел?
2. В каких единицах измеряется коэффициент линейного расширения?
3. Выведете формулу зависимости линейных размеров тела от температуры.
4. Можно ли в формуле (8.6) разность температур по шкале Кельвина заменить разностью температур по шкале Цельсия? Ответ обосновать.
5. Какая связь между коэффициентами линейного и объемного расширения изотропных твёрдых тел?

Приведите примеры практического использования теплового расширения тел.

Лабораторная работа № 9

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы - научиться определять относительную влажность воздуха разными способами.

Необходимое оборудование - гигрометр, термометр, психрометр.

Краткие теоретические сведения

В атмосферном воздухе всегда находится некоторое количество водяных паров. Относительной влажностью воздуха называется величина, равная отношению давления водяного пара p, содержащегося в воздухе при данной температуре к давлению насыщенных паров p_0 при этой же температуре

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\% . \qquad (9.1)$$

Точкой росы называют температуру, при которой пар становится насыщенным.

Интенсивность испарения жидкости зависит от следующих факторов:

1) рода жидкости;
2) температуры жидкости;
3) площади поверхности жидкости;
4) скорости потоков воздуха, окружающего жидкость.

Порядок выполнения работы

Метод 1.

1. Определите температуру воздуха t.
2. Поместите термометр в гигрометр. Налейте спирт в сосуд гигрометра.
3. Продувайте воздух через спирт в гигрометре до появления росы на зеркальце. Прекратите продувать.
4. Зафиксируйте температуру в момент исчезновения росы на зеркальце – точку росы t_p.

5. Найдите по таблице значения давления насыщенного пара для комнатной температуры p_0 и давление p ненасыщенного пара для комнатной температуры, которое равно давлению насыщенного пара, соответствующей точке росы t_p

6. По формуле (9.1) рассчитайте относительную влажность φ воздуха.

Метод 2.

1. Определите температуру сухого термометра t_c.
2. Определите температуру влажного термометра $t_{вл}$.
3. По психрометрической таблице определите относительную влажность φ воздуха.
4. Сравните результаты, полученные разными методами. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит интенсивность испарения жидкости?
2. Почему летним утром на листьях выпадает роса?
3. Как меняется температура жидкости при испарении? Почему?
4. Когда температура влажного термометра перестает меняться?
5. Могут ли совпадать показания сухого и влажного термометров?
6. Почему зачастую в холодильнике бывают влажные стенки?

Лабораторная работа № 10

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы - изучить устройство, принцип действия и характеристики основных электроизмерительных приборов.

Необходимое оборудование - набор электроизмерительных приборов, источник питания, реостаты.

Краткие теоретические сведения

Измерение электрических величин (тока, напряжения, частоты, фазы, мощности, энергии и т.д.) производят электроизмерительными приборами. В основу принципа действия приборов положен результат взаимодействия либо магнитных полей постоянного магнита и катушки, по которой протекает ток, либо двух катушек с током, либо электростатических зарядов и других факторов, способных так или иначе превратить электрическую энергию в механическую. Механическое усилие, развиваемое механизмом электроизмерительного прибора, отклоняет стрелку на угол, пропорциональный измеряемой величине, вращает диск счётчика или перемещает перо самописца по бумажной ленте, фиксируя результаты измерения.

Большое распространение получили также цифровые электроизмерительные приборы, не имеющие механических показывающих или регистрирующих устройств. Результаты измерений в них индуцируются в виде светящихся цифр на табло прибора.

Принцип действия цифровых измерительных приборов основан на преобразовании измеряемого непрерывного сигнала в электрический код, отображаемый в цифровой форме.

В общем случае цифровой прибор содержит входное устройство, аналогово-цифровой преобразователь и цифровое отсчетное устройство. Входное устройство предназначено для обеспечения большого входного сопротивления, изменения пределов измерения и определения полярности входного устройства.

Аналогово-цифровой преобразователь преобразует аналоговую величину в дискретный сигнал в виде электрического кода, пропорциональный измеряемой величине.

Результат измерения регистрируется на табло цифрового отсчетного устройства.

Достоинствами цифровых приборов являются: малые погрешности измерения (0,1 – 0,001%) в широком диапазоне измеряемых сигналов, высокое быстродействие (до 500 измерений/с), выдача результатов измерений в цифровом виде, возможность документальной регистрации измеряемой информации с помощью цифропечатающих устройств и ввода её в ПЭВМ для последующей обработки.

Электрический сигнал, воспринятый цифровым датчиком, может также непосредственно восприниматься специально созданной компьютерной программой с дальнейшей машинной обработкой и представлением результатов измерений в форме табличного и графического представления на экране монитора или распечатки принтере.

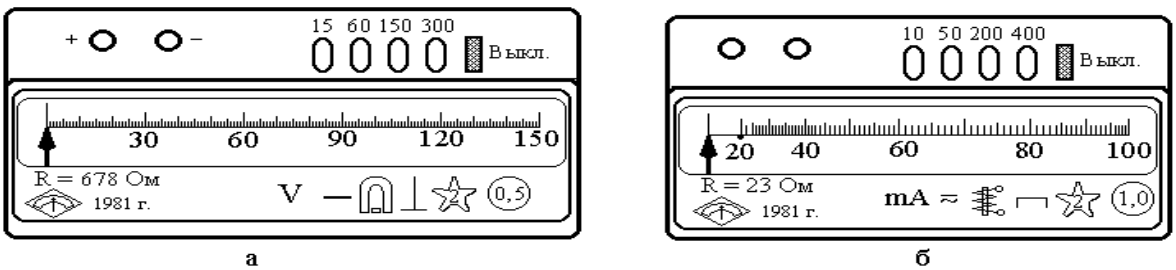
Электроизмерительные приборы, предназначенные для непосредственных измерений, называют рабочими. Градуировку и поверку рабочих приборов производят по образцовым приборам. Образцовые приборы, изготовленные с наивысшей достижимой точностью, называют эталонными. Последние, в свою очередь, также подразделяются на рабочие, используемые только для поверки образцовых приборов, и государственные, хранимые в специальных учреждениях и служащие для воспроизведения и поверки рабочих.

Измерительные приборы различают по назначению, конструкции, роду измеряемой величины, условиям эксплуатации, принципу действия, классу точности и другим признакам.

В зависимости от условий эксплуатации измерительные приборы по исполнению разделяют на три группы: А − для работы в сухих отапливаемых помещениях, Б − в закрытых неотапливаемых помещениях и В − в полевых ($В_1$) или морских ($В_2$) условиях. По защищённости от внешних полей приборы разделяют на две категории с допускаемыми изменениями в показаниях по классам точности. Устойчивость к механическим воздействиям определена следующими категориями: обыкновенные, обыкновенные с повышенной прочностью и устойчивые к механическим воздействиям, нечувствительные к тряске (ТП), вибропрочные (ВП), тряскоустойчивые (ТН), нечувствительные к вибрациям (ВН) и ударопрочные (УП).

В зависимости от рода измеряемой величины приборы подразделяют на амперметры, вольтметры и т.д. и комбинированные, измеряющие две и более величины (например, ампервольтметры, авометры). По способу преобразования энергии измеряемой величины во вращающий момент, действующий на подвижную часть, а также по конструктивным особенностям самого измерительного механизма приборы разделяют на магнитоэлектрические, электромагнитные, термоэлектрические и другие.

Во всём многообразии электроизмерительных приборов помогает разобраться специальная система условных обозначений, наносимых на шкалу (рис. 10.1). Кроме того, на шкале указывают род измеряемой величины (V − напряжение, вольты; А − ток, амперы; W − мощность, ватты и т.п.), категорию защищённости прибора от внешних полей, год выпуска и порядковый номер серии, товарный знак (фабричная марка) завода изготовителя (табл.10.1; 10.2).В качестве примера на рис. 10.1. дана иллюстрация внешнего вида многопредельных вольтметра (рис. 10.1. а) и миллиамперметра (рис. 10.1.



а б

Рис.10.1

б). Предел измерения задаётся кнопочным переключателем с указанием предела в единицах измеряемой величины. Вольтметр предназначен для работы в цепях постоянного тока, принцип его действия магнитоэлектрический с подвижной рамкой (табл. 10.1), рабочее положение − вертикальное, класс точности 0,5. Миллиамперметр может быть использован в цепях постоянного и однофазного переменного токов, принцип действия − электромагнитный, рабочее положение − горизонтальное, класс точности 1,0. Изоляция обоих приборов испытана при напряжении 2 кВ.

Электроизмерительный прибор механического действия, включённый в измеряемую цепь, потребляет из неё некоторую энергию, расходуемую на перемещение (вращение) подвижных частей измерительного механизма, нагревание проводов рамки, добавочных резисторов и других вспомогательных элементов. Эта энергия называется собственным потреблением прибора. Собственное потребление − важный параметр электроизмерительного прибора: чем оно больше, тем «грубее» прибор и тем большее влияние он оказывает на режим измеряемой цепи, увеличивая погрешность измерений.

Таблица 10.1.

Условные обозначения на электроизмерительных приборах

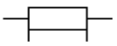
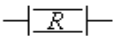
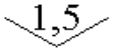
Основные обозначения	
Обозначение принципа действия прибора	**Условное обозначение**
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Логометр магнитоэлектрический	
Электромагнитный	
Электродинамический	
Ферродинамический	
Индукционный	
Вибрационный	
Электростатический	

Токоведущие элементы электроизмерительного прибора рассчитаны на длительную эксплуатацию при определённых значениях тока и напряжения. При ошибочном включении в аварийной ситуации ток через прибор и напряжение могут во много раз превышать номинальное. Перегрузки опасны не столько перегревом или пробоем электрической изоляции, сколько динамическими нагрузками, вызывающими механические повреждения деталей и узлов прибора. В паспорте для каждого типа приборов указывают перегрузочную способность, которая нормируется государственным стандартом. Электрическая прочность изоляции токоведущих частей прибора имеет немаловажное значение. Существенная утечка тока через изоляцию приводит к погрешностям в измерениях и может являться причиной поражения электрическим током обслуживающего персонала. Значение синусоидального напряжения частотой 50 Гц,

которое выдерживает изоляция проводников и элементов прибора в течение одной минуты, обычно указано на его шкале в киловольтах.

Таблица 10.2.

Дополнительные обозначения на электроизмерительных приборах

Дополнительные обозначения	
Обозначение принципа действия прибора	**Условное обозначение**
Термопреобразователь неизолированный	
Термопреобразователь изолированный	
Преобразователь электронный в измерительной цепи	
Выпрямитель полупроводниковый	
Напряжение испытательное 500 В	
Напряжение испытательное больше 500 В, например, 2 кВ	
Ссылка на соответствующий документ	
Шунт	
Сопротивление добавочное	
Экран электростатический	
Экран магнитный	
Корректор	
Класс точности в % при нормировании ошибки от предела измерения, например, 1,5	1,5
Класс точности в % при нормировании ошибки от длины шкалы, например, 1,5	
Ток постоянный	—
Ток переменный однофазный	~
Ток постоянный и переменный однофазный	≂
Ток трёхфазный переменный	≋
Горизонтальное положение прибора	
Вертикальное положение прибора	
Положение прибора под углом 60^0	
Знак полярности у зажимов при включении в цепь постоянного тока	— +
Знак у общего зажима комбинированного прибора	*

Есть общие для всех электроизмерительных приборов характеристики. Это такие, как чувствительность и погрешность.

Чувствительностью электроизмерительных приборов называется отношение линейного или углового перемещения указателя $\Delta\varphi$ к изменению измеряемой величины Δx, вызывающему это перемещение

$$S = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}. \tag{10.1}$$

Величина $C = 1/S$ называется ценой деления и определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление. Если шкала прибора имеет n делений, а A − предел шкалы (максимальное показание), то

$$C = \frac{A}{n}. \tag{10.2}$$

Результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины. Величина отклонения от истинного значения характеризуется погрешностью измерения. Если в качестве действительного значения измеряемой величины принимается величина, получаемая при измерении образцовым прибором, то тогда абсолютная погрешность

$$\Delta = \pm(\alpha - \alpha_0), \tag{10.3}$$

где α − показания прибора; α_0 − действительное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность, %,

$$\delta = \frac{\Delta}{\alpha_0} \cdot 100\%. \tag{10.4}$$

В большинстве случаев для характеристики точности электроизмерительных приборов пользуются приведенной погрешностью, %,

$$\gamma = \pm\frac{\Delta}{A} \cdot 100\%, \tag{10.5}$$

Где A − предел шкалы прибора (максимальное показание).

По значению приведенной погрешности приборы делят на группы по классу точности. Класс точности характеризуется числом, показывающим наименьшее допустимое значение основной приведенной погрешности.

Абсолютная погрешность может быть определена по известному классу точности из выражения (10.5). Например, класс точности 0,5 вольтметра с верхним пределом измерения 150 В означает, что его абсолютная погрешность составляет 0,75 В:

$$\Delta = \frac{0{,}5 \cdot 150B}{100} = 0{,}75B. \tag{10.6}$$

Согласно ГОСТу приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 − прецезионные; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 − технические.

Входное сопротивление прибора − это сопротивление прибора со стороны его входных зажимов. Чем больше входное сопротивление вольтметра, тем меньшее влияние оказывает прибор на измеряемую цепь и тем меньше погрешность измерений. Для амперметра − наоборот: чем меньше входное сопротивление, тем меньше погрешность. По этой причине амперметры, как правило, изготовляются с малыми внутренними сопротивлениями в расчёте, что при эксплуатации они будут включаться в цепь последовательно с нагрузкой.

Иное включение в цепь амперметра (без последовательно подсоединённой нагрузки) ведёт к мгновенному выходу прибора из строя и категорически воспрещается!!!

Принципы действия электроизмерительных приборов

Приборы магнитоэлектрической системы

Предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы (рис. 10.2.) основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита 2 с магнитным полем лёгкой подвижной рамки 3, по которой протекает измеряемый ток. В результате этого взаимодействия возникает вращающий момент M_1, под действием которого подвижная часть прибора вместе со стрелкой 1 поворачивается вокруг своей оси 6

$$M_1 = k_1 I. \qquad (10.7)$$

Противодействующий момент создаётся закручивающимися спиральными пружинами 7, причём

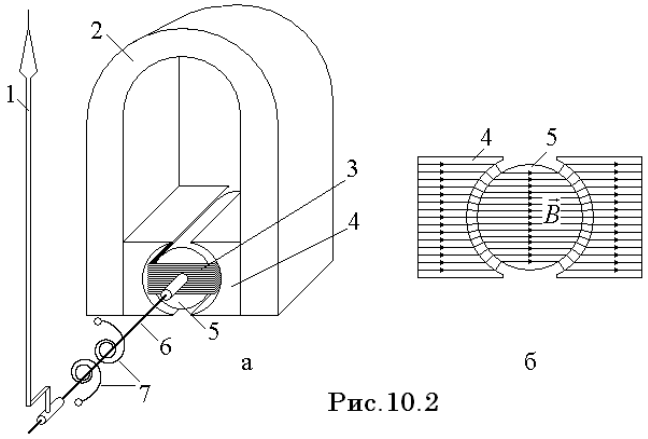


Рис.10.2

$$M_2 = k_2 \varphi, \qquad (10.8)$$

где φ − угол поворота при закручивании пружины. Вращающий момент M_1 уравновешивается вращающим моментом M_2 закручивающихся спиральных пружин, и при достижении равновесия

$$k_1 I = k_2 \varphi. \qquad (10.9)$$

Отсюда видно, что зависимость угла поворота рамки от значения тока может иметь линейный характер

$$\varphi = \frac{k_1}{k_2} I = kI, \qquad (10.10)$$

если коэффициент k не зависит от угла поворота. Для закручивающихся спиральных пружин k_2 не зависит от угла поворота, следовательно, необходимо обеспечить только постоянство k_1. Независимым от угла поворота k_1 будет только при движении рамки с током в радиальном магнитном поле, при взаимной перпендикулярности вектора индукции $\vec{B}$ и нормали к поверхности плоской рамки (рис. 10.2. б). Необходимую конфигурацию магнитного поля по траектории движения рамки с током задают с помощью магнитопровода, расположенного между полюсами постоянного магнита, состоящего из ферромагнитных наполюсников и цилиндра, как указано на рис. 10.2. б.

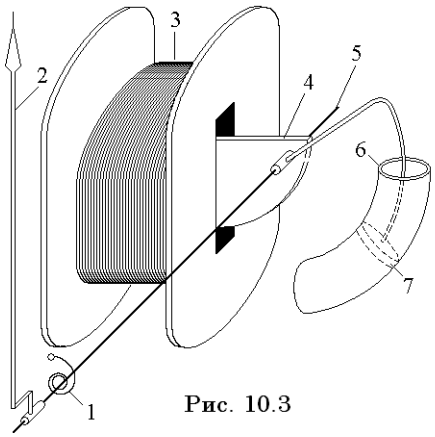


Рис. 10.3

Приборы электромагнитной системы.

Предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях переменного и постоянного токов. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки 3 (рис. 10.3.), по которой протекает измеряемый ток, и эксцентричного укреплённого на оси железного сердечника 4, являющегося подвижной частью прибора. Под действием магнитного поля катушки сердечник, стремясь расположиться так, чтобы его пересекало

возможно большее число силовых линий, втягивается в катушку и поворачивается по мере увеличения в ней силы тока. Противодействующий момент создаётся спиральной пружиной 1. Приборы электромагнитной системы снабжены воздушным успокоителем, представляющим собой камеру 6, в которой перемещается алюминиевый поршенёк 7 (демпфер). При повороте сердечника поршенёк встречает сопротивление воздуха, вследствие чего колебания подвижной части быстро затухают.

Демпфирующее устройство может быть также основано на взаимодействии токов Фуко, возникающих в сердечнике, связанном с осью прибора 5, при его перемещении в магнитном поле вспомогательного постоянного магнита.

Магнитное поле катушки пропорционально измеряемому току. Намагничивание железного сердечника также возрастает с увеличением тока. Поэтому можно сказать, что вращающий момент пропорционален квадрату тока:

$$M_1 = k_1 I^2. \qquad (10.11)$$

Противодействующий момент M_2, создаваемый спиральной пружиной 1, пропорционален углу поворота подвижной части прибора:

$$M_2 = k_2 \varphi. \qquad (10.12)$$

При равновесии $M_1 = M_2$, откуда

$$\varphi = \frac{k_1}{k_2} I^2 = kI^2. \qquad (10.13)$$

Для измерения параметров переменного тока важно то, что показания прибора не зависят от направления тока в катушке ($\sim I^2$), но, при этом, шкала приборов электромагнитной системы нелинейная. Подбором формы сердечника удаётся в основном диапазоне измерений приблизить шкалу к линейной. Однако, диапазон, соответствующий малым значениям тока в катушке, как правило, выпадает из области измерений и на шкале ограничивается чёрной точкой (рис. 10.1. б).

Приборы электромагнитной системы просты по конструкции и недороги. Точность этих приборов зависит от внешнего магнитного поля, частоты измеряемого переменного тока и т.д. Следует отметить, что точность приборов электромагнитной системы, по сравнению с приборами других систем невелика.

Приборы электродинамической системы

Предназначены для измерения тока, напряжения, мощности в цепях постоянного и переменного тока. Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии катушек, по которым протекает измеряемый ток. На рис. 10.4. схематично изображено устройство электродинамического прибора. Внутри неподвижно закреплённой катушки 2 может вращаться на оси 5 подвижная катушка 3, с которой жёстко связана стрелка 1. Противодействующий момент создаётся спиральной пружиной 6. Для устранения колебаний подвижных частей прибора применяется демпфер 4.

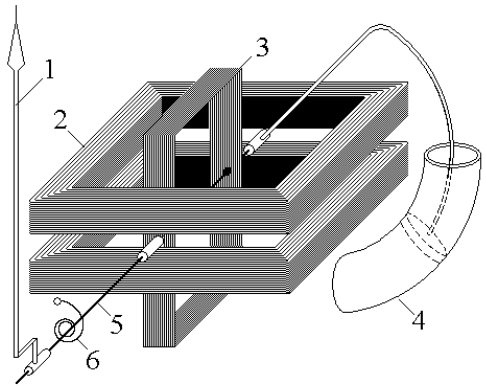


Рис. 10.4

Вращающий момент M_1, действующий на подвижную катушку, пропорционален току I_1 в неподвижной катушке и току I_2 в подвижной катушке:

$$M_1 = k_1 I_1 I_2. \qquad (10.14)$$

Противодействующий момент

$$M_2 = k_2 \varphi. \qquad (10.15)$$

При равновесии $M_1 = M_2$ и

$$\varphi = \frac{k_1}{k_2} I_1 I_2 = k I_1 I_2. \qquad (10.16)$$

Если катушки соединены последовательно, то

$$\varphi = k I^2. \qquad (10.17)$$

Полученные выражения показывают, что шкала приборов электродинамической системы неравномерна.

При изменении направления тока в обеих катушках направление вращающего момента не изменяется, из чего следует пригодность приборов этой системы для измерения параметров переменного тока. Точность и чувствительность электродинамических приборов для переменного тока очень высоки.

Таблица 10.3.

Некоторые условные обозначения в электрических схемах

	Резистор нерегулируемый		Конденсатор нерегулируемый
	Реостат с разрывом и без разрыва цепи		Конденсатор регулируемый
	Потенциометр		Заземление
	Катушка индуктивности без сердечника		Гальванический элемент
	Катушка индуктивности с сердечником		Диод полупроводниковый
A	Амперметр	V	Вольтметр
μA	Микроамперметр	mV	Милливольтметр
Ω	Омметр	V	Цифровой вольтметр
	Осциллограф		Фотоэлемент

Устройство многопредельных приборов. Шунтирующие и дополнительные сопротивления

Чтобы увеличить диапазон измерения силы тока в n, раз необходимо, чтобы через амперметр с сопротивлением R_A по-прежнему проходил ток силой I_{max}, а ток $(n-1)I_{max}$ проходил через параллельный амперметру шунт $R_ш$ (рис. 10.5.). Напряжение между точками А и В

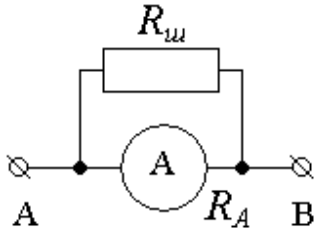


Рис. 10.5

$$U = I_{\max} R_A = (n-1) I_{\max} R_ш. \qquad (10.18)$$

Отсюда видно, что сопротивление шунта

$$R_ш = \frac{R_A}{(n-1)} \qquad (10.19)$$

Чтобы увеличить диапазон измерения напряжения в n раз необходимо, чтобы на вольтметр с сопротивлением R_V приходилось бы напряжение U_{max}, а на добавочном сопротивлении $(n-1)U_{max}$ (рис. 10.6).

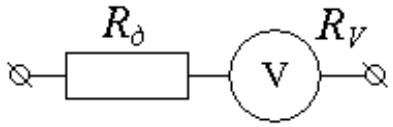


Рис. 10.6

Так как через вольтметр и добавочное сопротивление протекает ток одной и той же силы, то

$$I = \frac{U_{\max}}{R_V} = \frac{(n-1)U_{\max}}{R_д}. \qquad (10.20)$$

Откуда добавочное сопротивление

$$R_д = R_V(n-1) \qquad (10.21)$$

Многопредельные вольтметры и амперметры включают в себя системы шунтов и добавочных сопротивлений, которыми изменяют пределы измеряемых величин.

Многопредельный прибор следует включать так, чтобы относительная погрешность измерения была минимальной. Иногда многопредельные приборы снабжают различными шкалами. Отсчёт производится по шкале, цена деления которой наиболее удобна для снятия отсчётов. Часто приборы имеют одну шкалу. В таких случаях значение измеряемой величины определяется по формуле

$$\alpha = A\frac{n_i}{n}, \qquad (10.22)$$

где A − максимальное значение измеряемой величины, которое можно определить на данном пределе измерений; n_i − показание стрелки прибора в делениях шкалы; n − полное число делений шкалы.

Влияние измерительных приборов на работу электрической схемы

Всегда надо помнить о том, что включение в схему измерительного прибора изменяет условия её работы. Поэтому измеренные прибором значения силы тока или напряжения будут отличаться от тех значений, которые существуют в схеме без прибора.

Так, если измерять неизвестное сопротивление резистора с помощью амперметра и вольтметра, то нужно подключить резистор к источнику тока и измерить силу тока, текущего через резистор, и напряжение на нем. Затем, используя закон Ома, определить значение неизвестного сопротивления:

$$R_X = \frac{U}{I} \qquad (10.23)$$

Возможные схемы подключения амперметра и вольтметра изображены на рис. 10.7 и рис. 10.8.

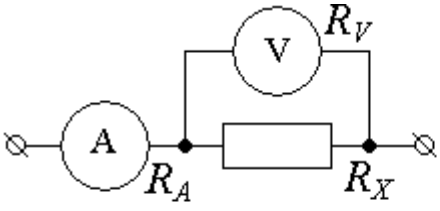


Рис. 10.7

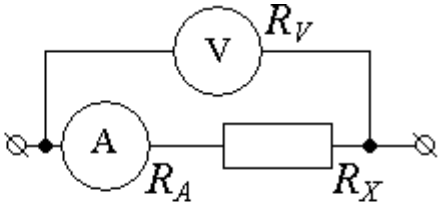


Рис. 10.8

Первая схема применяется тогда, когда внутреннее сопротивление вольтметра $R_V >> R_X$. Сила тока, измеряемая амперметром,

$$I_1 = U_1\left(\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_X}\right). \qquad (10.24)$$

Если $R_V >> R_X$ то $R_X \approx U_1/I_1$. При этом внутреннее сопротивление амперметра R_A

влияния на результат измерения не оказывает.

При использовании второй схемы напряжение, измеряемое вольтметром,

$$U_2 = I_2(R_A + R_X). \quad (10.25)$$

И если $R_X >> R_A$, то $R_X \approx U_2/I_2$. При этом внутреннее сопротивление вольтметра влияния на результат измерения не оказывает.

При значениях R_X, R_A, R_V одного порядка необходимо воспользоваться обеими схемами одновременно. При использовании второй схемы

$$U_2 = I_2(R_A + R_X), \quad (10.26)$$

а при использовании первой схемы, считая, что U_2 равно внешнему напряжению, подаваемому на обе схемы, имеем:

$$U_2 = U_1 + I_1 R_A. \quad (10.27)$$

Выражая из (10.26) внутреннее сопротивление амперметра

$$R_A = \frac{U_2 - U_1}{I_1} \quad (10.28)$$

и подставляя его значение в (10.5), получаем, что

$$R_X = \frac{U_2}{I_2} + \frac{U_1}{I_1} - \frac{U_2}{I_1}. \quad (10.29)$$

Так как порядок величины сопротивления резисторов может быть неизвестен, то необходимо использовать обеими схемами и по полученным результатам определить, какими значениями U и I необходимо пользоваться, чтобы с достаточной точностью рассчитать значение R_X.

Экспериментальные задания

1. Описание технических характеристик приборов.

Получив для работы амперметр и вольтметр, ответьте на следующие вопросы (табл. 1).

Таблица 1

	Наименование	Амперметр	Вольтметр
1.	Марка прибора, заводской номер, год изготовления		
2.	Система прибора		
3.	Характер измеряемого тока		
4.	Класс точности		
5.	Пределы измерения		
6.	Величина шкалы		
7.	Цена деления		
8.	Абсолютная приборная погрешность (в делениях)		
9.	Испытательное напряжение		
10.	Рабочее положение прибора		
11.	Внутреннее сопротивление прибора		

2. Используя имеющиеся в наличии приборы, составить схему для измерения

силы тока и напряжения. Собрать по ней цепь и проделать измерения. Результаты занести в таблицу.

3. Изучить паспорт цифрового вольтметра. Научиться производить измерения с помощью цифрового вольтметра.

Контрольные вопросы

1. По каким признакам можно классифицировать электроизмерительные приборы?
2. Как классифицируются электроизмерительные приборы по принципу действия?
3. Каков принцип действия прибора магнитоэлектрической системы?
4. Каков принцип действия прибора электромагнитной системы?
5. Каков принцип действия прибора электродинамической системы?
6. Что такое приведенная погрешность?
7. Что такое класс точности? Какие классы точности Вам известны?
8. Какие условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов Вы знаете?

Лабораторная работа № 11

РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы - изучить методы расчёта шунтов и добавочных сопротивлений; расширить пределы измерения гальванометра по току и напряжению; экспериментально проверить выполненные расчёты.

Необходимое оборудование - гальванометр, два магазина сопротивлений, реостат, амперметр, вольтметр, источник питания постоянного тока, ключ, трёхполюсный переключатель.

Краткие теоретические сведения

За основу измерительного прибора часто берут чувствительный гальванометр. Подключив к нему различным способом сопротивления, его применяют в зависимости от целесообразности для измерения напряжения или тока. Это возможно, так как по закону Ома напряжение и ток прямо пропорциональны друг другу. Амперметры и вольтметры отличаются внутренними сопротивлениями, ценой деления и шкалами.

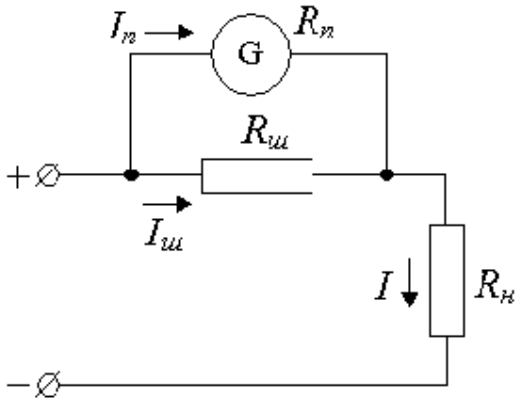


Рис. 11.1

Для того чтобы на основе гальванометра сделать амперметр, параллельно гальванометру подключают сопротивление, называемое шунтом (рис. 11.1).

При параллельном соединении напряжение на приборе и шунте одинаково, т.е.

$$I_ш R_ш = I_п R_п, \qquad (11.1)$$

а общий ток равен сумме токов, протекающих через шунт и прибор

$$I = I_ш + I_п. \qquad (11.2)$$

Из (11.2) найдём $I_ш = I - I_п$ и подставим его в (11.1):

$$(I - I_n)R_ш = I_n R_n, \tag{11.3}$$

откуда $\left(\frac{I}{I_n} - 1\right)R_ш = R_n$.

Так как требовалось расширить предел измерения гальванометра по току в n раз, то $\frac{I}{I_n} = n$; тогда $(n-1)R_ш = R_n$ и

$$R_ш = \frac{R_n}{n-1}. \tag{11.4}$$

Если цена деления гальванометра по току равна k_1, цена деления амперметра стала равной $k_1 n$, а чувствительность прибора при этом уменьшилась в n раз.

Для использования гальванометра в качестве вольтметра к гальванометру последовательно подключают добавочное сопротивление (рис. 11.2).

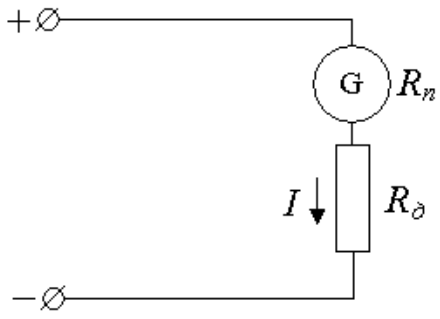


Рис. 11.2

Пусть U_n − напряжение на гальванометре, при котором его стрелка отклоняется на всю шкалу, и требуется этим прибором измерить напряжение U в n раз большее U_n, т.е. $\frac{U}{U_n} = n$.

При последовательном подключении к гальванометру добавочного сопротивления $R_д$ сопротивление полученного вольтметра $R_n + R_д$, а напряжение на нём

$$U = I(R_n + R_д) \tag{11.5}$$

или $U = IR_n + IR_д$, но $IR_n = U_n$; $U - U_n = IR_д$.

Разделив левую и правую части на U_n, получим искомое сопротивление $R_д$.

$\frac{U}{U_n} - 1 = \frac{IR_д}{U_n}$; $n - 1 = \frac{R_д}{R_n}$;

$$R_д = R_n(n-1). \tag{11.6}$$

Длину проволочных шунтов и добавочных сопротивлений можно определить так:

$$l = \frac{R_ш S}{\rho}, \tag{11.7}$$

где S − площадь поперечного сечения проводника; ρ − удельное сопротивление проводника.

Класс точности шунтов и добавочных сопротивлений должен соответствовать классу точности прибора, пределы измерения которого расширяются. Для изготовления их используют проводники с малым коэффициентом температурного сопротивления и малым коэффициентом термоЭДС (например, манганин).

Порядок выполнения работы

Задание 1. Расширение предела измерения по току.

1. Получить у преподавателя задание: во сколько раз нужно расширить предел измерения гальванометра, т.е. значение числа n.
2. Собрать цепь по схеме рис. 11.3, где R_0 − магазин сопротивлений Р33; $R_ш$ − магазин сопротивлений Р32.

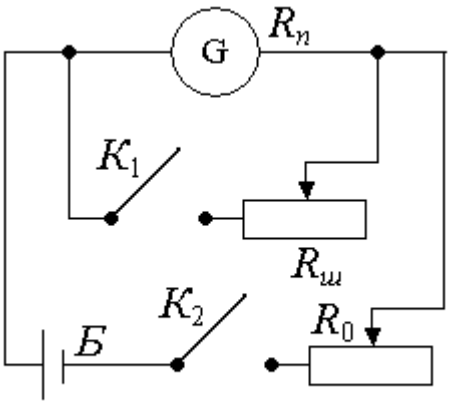


Рис. 11.3

3. С помощью ручек сопротивления R_0 установить максимальное сопротивление.

4. Замкнуть ключ K_1. Изменяя значение R_0, добиться отклонения стрелки гальванометра на всю шкалу.

5. Разомкнуть ключ K_2.

6. Рассчитать сопротивление шунта (11.4).

7. Набрать с помощью ручек $R_ш$ найденное значение сопротивления шунта.

8. Замкнуть ключ K_2 и подрегулировать точное положение стрелки на максимальное деление шкалы.

9. Замкнуть ключ K_1. Если расчёт и установка шунта выполнены верно, то стрелка гальванометра должна установиться на число делений в n раз меньшем, чем при разомкнутом ключе K_1, т.е. при отсутствии шунта.

10. Рассчитать длину проволоки, которую можно использовать в качестве шунта для того, чтобы расширить предел измерения гальванометра по току в то же число раз (11.7).

Контрольные вопросы

1. Что называется ценой деления прибора? чувствительностью?
2. Смысл и назначение множителей шунта и добавочного сопротивления?
3. Как расширить предел измерения амперметра? вольтметра?
4. Каково соотношение между внутренним сопротивлением амперметра и сопротивлением цепи, в которую он включается? Почему?
5. Какие требования предъявляются к материалам, используемым для изготовления шунтов? добавочных сопротивлений?
6. Почему приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу?

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРА ОТ НАГРУЗКИ

Цель работы - изучить зависимость полезной, полной мощностей и КПД аккумуляторной батареи от силы тока в цепи; экспериментально проверить теоретические выводы.

Необходимое оборудование - аккумуляторная батарея, вольтметр, амперметр, реостат, два ключа.

Краткие теоретические сведения

Аккумуляторы – химические источники тока, в которых электрическая энергия получается за счёт химических реакций. На практике применяют аккумуляторы кислотные и щелочные. В качестве электролита в щелочных аккумуляторах используется 20 % раствор щёлочи в воде. В зависимости от химического состава электродов щелочные аккумуляторы делятся на железо-никелевые, кадмиево-никелевые, цинково-никелевые и т.д. Наиболее часто применяются железо-никелевые и кадмиево-никелевые. Корпуса таких аккумуляторов изготавливают из никелированного железа. Активной массой анодов

до зарядки является гидроксил никеля $Ni(OH)_2$.

Схематически реакции зарядки − разрядки можно записать так:

$$Fe + 2Ni(OH)_3 \quad \frac{разрядка \Rightarrow}{\Leftarrow зарядка} \quad Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2;$$

$$Cd + 2Ni(OH)_3 \quad \frac{разрядка \Rightarrow}{\Leftarrow зарядка} \quad Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2.$$

При зарядке аккумулятора активная масса пластин на аноде превращается в гидроксид никеля $Ni(OH)_2$, а активная масса на аноде − в губчатое железо или губчатый кадмий. При разрядке аккумулятора совершается обратный процесс. Рабочее напряжение щелочных аккумуляторов 1,3 … 1,1 В.

Аккумулятор характеризуется электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r.

Мощность, расходуемая источником, частично выделяется во внешней цепи ($P_{полез}$), частично – на внутреннем сопротивлении (рис. 12.1).

Коэффициент полезного действия источника (КПД) равен:

(12.1)

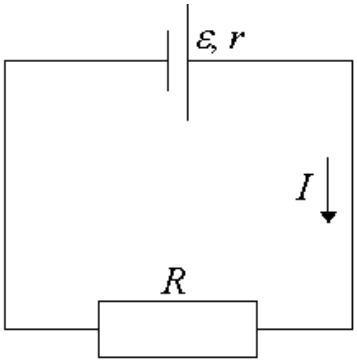


Рис. 12.1

Закон Ома для замкнутой цепи может быть записан в форме:

$$\varepsilon = IR + Ir, \qquad (12.2)$$

где ε – электродвижущая сила источника, I – величина тока, R – внешнее сопротивление, r – внутреннее сопротивление источника.

Величину

$$U = IR = \varepsilon - rI, \qquad (12.3)$$

называют напряжением во внешней цепи. С нарастанием тока напряжение линейно убывает. При разомкнутой цепи $U = \varepsilon$.

Домножив уравнение (12.2) на величину тока

$$\varepsilon I = I^2 R + I^2 r, \qquad (12.4)$$

получим линейную зависимость полной мощности от величины тока (рис. 12.2, 2)

$$P_{полн} = \varepsilon I. \qquad (12.5)$$

Полезная мощность определится выражением:

$$P_{полез} = UI = I^2 R. \qquad (12.6)$$

Через характеристики источника полезная мощность дает параболическую зависимость от величины тока (рис. 12.2, 3):

$$P_{полез} = \varepsilon I - rI^2. \qquad (12.7)$$

Исследование зависимости на максимум показывает, что полезная мощность максимальна при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений.

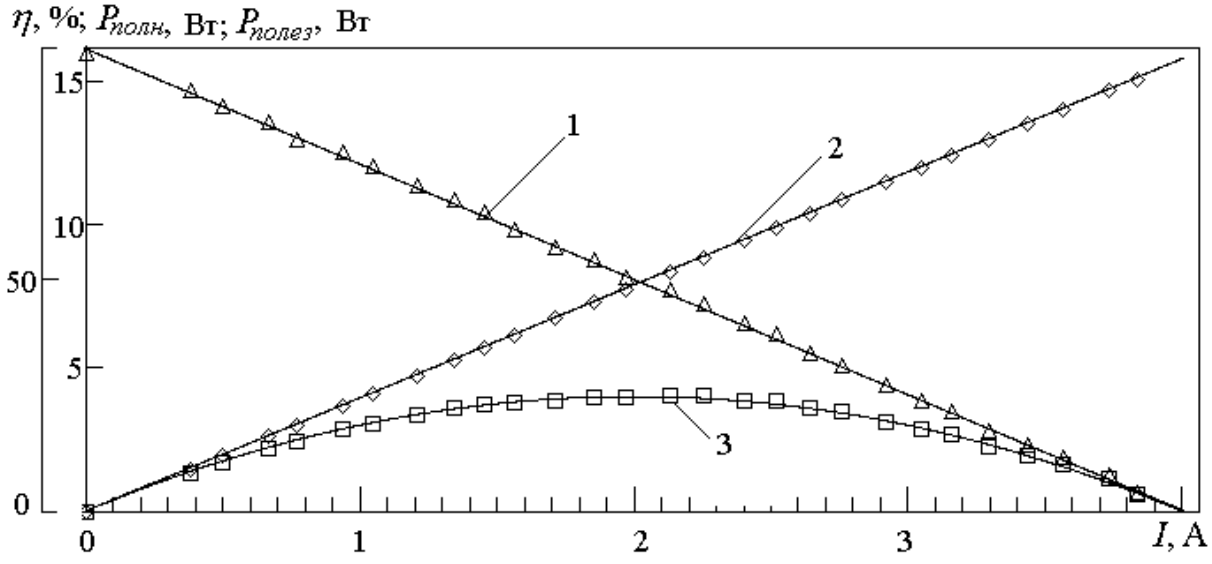


Рис. 12.2

Зависимость КПД от величины тока линейная (рис. 12.2, 1):

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon I - rI^2}{\varepsilon I} = 1 - \frac{r}{\varepsilon} I. \qquad (12.8)$$

Экспериментально, воспользовавшись вольтметром и амперметром, мы можем получить зависимость напряжения во внешней цепи от величины тока $U(I)$ и рассчитать соответствующие зависимости от величины тока полной, полезной мощности и КПД. Аппроксимация этих зависимостей полиномом соответствующей степени позволит найти параметры ε и r источника.

Описанные выше зависимости могут быть выражены также через отношение внешнего и внутреннего сопротивлений R/r

$$\eta = \frac{P_{полез}}{P_{полн}} = \frac{I^2 R}{I^2 (R+r)} = \frac{R}{R+r} = \frac{R/r}{R/r+1}. \qquad (12.9)$$

$$P_{полез} = \frac{\varepsilon^2}{r} \frac{R/r}{(R/r+1)^2}. \qquad (12.10)$$

$$P_{полн} = \frac{\varepsilon^2}{r} \frac{1}{1+R/r}. \qquad (12.11)$$

$$I = \frac{\varepsilon}{r} \frac{1}{1+R/r}. \qquad (12.12)$$

Максимальные значения этих величин соответственно равны

$$\eta_{\max} = 1 \quad при \quad R/r = \infty.$$

$$(P_{полез})_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r} \quad при \quad R/r = 1.$$

$$(P_{полн})_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{r} \quad при \quad R/r = 0.$$

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r} \quad при \quad R/r = 0.$$

Обычно графически (12.9 – 12.12) изображают в относительных координатах (рис. 12.3)

$$P_{полез}/(P_{полез})_{\max} = 4\frac{R/r}{(R/r+1)^2}. \qquad (12.13)$$

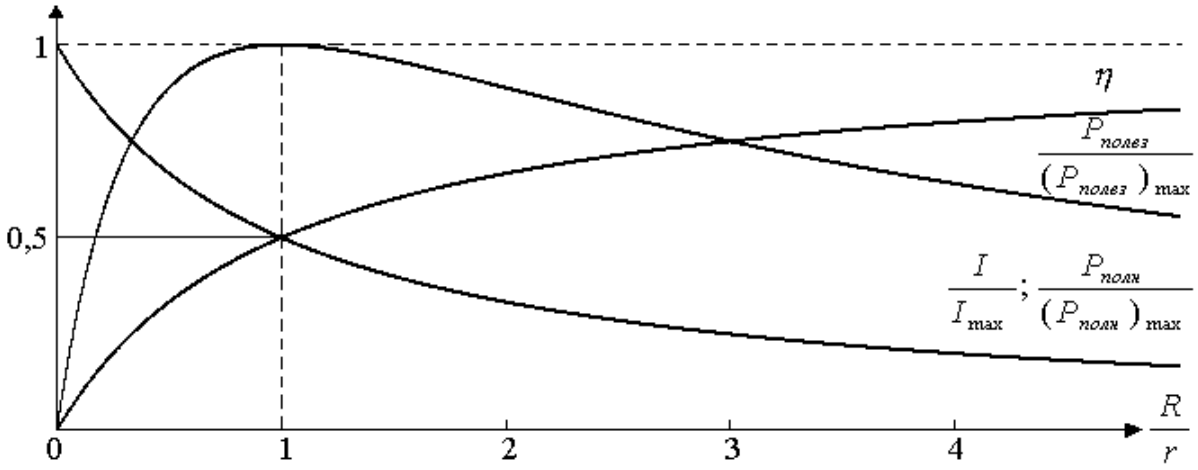


Рис. 12.3

$$P_{полн}/(P_{полн})_{\max} = \frac{1}{1+R/r}. \qquad (12.14)$$

$$I/I_{\max} = \frac{1}{1+R/r}. \qquad (12.15)$$

Экспериментально требуется исследовать зависимость полезной и полной мощностей и КПД от силы тока. Обработку полученных результатов можно провести с помощью компьютерной программы, данной в приложении с аппроксимацией полученных данных полиномом, соответствующей степени, графическими построениями.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 12.4).

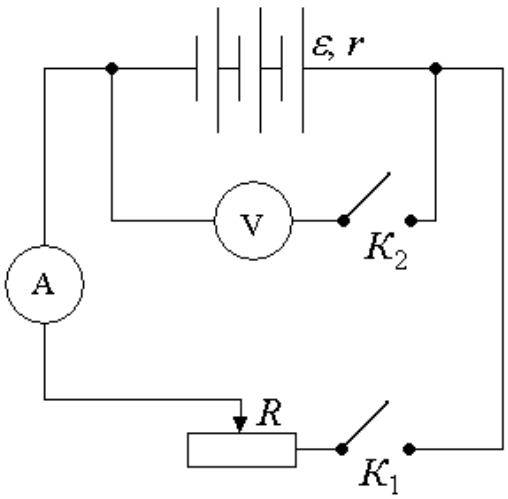


Рис. 12.4

2. Оставив ключ K_1 разомкнутым, замкнуть ключ K_2. Записать показания вольтметра. Эту величину можно приблизительно считать равной ЭДС.

3. Введя всё сопротивление R, замкнуть ключ K_1. Записать показания амперметра и вольтметра. Увеличивая последовательно силу тока, довести её до максимального значения, записывая при этом в таблицу значения силы тока и напряжения.

4. Вычислить для всех значений силы тока и напряжения $P_{полн}$, $P_{полез}$ и $\eta(I)$.

5. Построить на одних и тех же осях графики $P_{полн}(I)$, $P_{полез}(I)$, $\eta(I)$ и сравнить их с теоретическими.

Контрольные вопросы

1. Как устроен щелочной аккумулятор?
2. Что называют полезной мощностью?
3. Что называют полной мощностью?
4. Как зависит полная, полезная мощность и КПД от силы тока? Вывести формулы.

Лабораторная работа № 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

Цель работы - представить графически картины электростатических полей с помощью эквипотенциальных поверхностей и линий напряжённости для двух параллельных пластин и двух пластин и металлического цилиндра между ними, для двух коаксиальных цилиндров.

Необходимое оборудование - электролитическая ванна, трансформатор 220/12 В, вольтметр, реостат, нуль-индикатор (вольтметр), электроды разной конфигурации, зонды.

Краткие теоретические сведения

Электростатическое поле в каждой точке характеризуется вектором напряжённости $\vec{E}$ и φ потенциалом. При конструировании электронных ламп, конденсаторов, электронных линз и других приборов часто требуется знать распределение электрического поля в пространстве, заключённом между электродами сложной формы. Аналитический расчёт поля удаётся только для самых простых конфигураций электродов и в общем случае невыполним. Поэтому сложные электростатические поля исследуются экспериментально.

Точки поля, имеющие одинаковый потенциал, образуют поверхности равного потенциала (эквипотенциальные поверхности). Система эквипотенциальных поверхностей исчерпывающим образом описывает электростатическое поле.

Для исследований используют модель объекта, расположенную в электролитической ванне. Измерения в электролитической ванне производят с помощью электродов, форма которых воспроизводит объект в некотором масштабе, чаще увеличенном. Электроды располагают друг относительно друга так же, как они расположены в моделируемом приборе. На них подают потенциалы, равные действительным или изменённые в заданном отношении. При этом между электродами образуется электрическое поле, отличающееся от исследуемого по величине напряжённости, но совпадающее с ним по конфигурации с точностью до масштаба.

Заполним теперь пространство между электродами слабо проводящей жидкостью. Замена непроводящей среды на проводящую может, вообще говоря, изменить распределение электрического поля. Выясним условия, необходимые для того, чтобы такого изменения не произошло.

Распределение электрического поля в пространстве описывается дифференциальными уравнениями в частных производных (уравнения Максвелла), решения которых зависят как от формы уравнений, так и от граничных условий на стенках ванны и поверхности жидкости.

Граничные условия на поверхности жидкости и воздуха определяются тем, что электрический ток не может идти перпендикулярно к этой поверхности (из проводящей

жидкости в непроводящий воздух). Так как плотность тока пропорциональна напряжённости $\vec{E}$ электрического поля, то в жидкости установится такое распределение потенциала, при котором вектор $\vec{E}$ не имеет составляющей, перпендикулярной к поверхности. В электролитической ванне, следовательно, можно без искажений моделировать только такие поля, которые не имеют составляющих, перпендикулярных к той плоскости, где будет проходить поверхность жидкости. Это же требование, в принципе, должно выполняться на дне и стенках ванны. Последние обычно находятся достаточно далеко от исследуемой модели объекта, так что их влияние можно не учитывать.

При определённых условиях распределение поля в электролитической ванне с достаточной точностью воспроизводит распределение поля в непроводящей среде (в вакууме или воздухе) при том же расположении электродов. Исследование поля в проводящей среде существенно проще, чем в непроводящей. Обычно в электролитической ванне производится измерение не вектора напряжённости поля, а электрических потенциалов. Для измерений в жидкость вводят зонды – тонкие металлические проводники, соединённые с измерительной аппаратурой.

Введение в жидкость металлических проводников − зондов, вообще говоря, изменяет распределение поля в жидкости, так как вдоль зонда принудительно устанавливается одинаковый электрический потенциал. Измерительные зонды поэтому не вызывают искажений лишь в том случае, если они располагаются вдоль линий, которые и до внесения зонда обладали одинаковым потенциалом. Особенно удобно исследовать с помощью зондов плоские поля. Зонд, расположенный параллельно этой оси, в этом случае заведомо не искажает распределения электрического поля.

Описание измерительной установки и порядок выполнения работы

Изучение электрического поля путём экспериментально найденного расположения эквипотенциальных поверхностей этого поля может быть проведено на установке, электрическая схема которой показана на рис. 13.1.

Эта установка состоит из сосуда, наполненного водой, в которую помещается система электродов. Сосуд имеет установочные винты, которыми устанавливают одинаковую высоту слоя воды. Пластины, к которым подводится переменная разность потенциалов, являются электродами. Переменная разность потенциалов применяется во избежание возникновения электролиза в проводящей среде.

В цепь электродов введено ограничивающее сопротивление на случай возможного короткого замыкания электродов между собой.

При исследовании эквипотенциальных линий поля, лежащих в горизонтальной плоскости, для двух параллельных в данный момент разноимённо заряженных плоских электродов поступают так. Намечают вдоль оси OX, перпендикулярной к поверхности электродов (рис. 13.1), точки, разнящиеся по потенциалу на некоторое одно и тоже значение (1 В), для чего вольтметром измеряют разность потенциалов между двумя соседними точками, в которые ставят вертикальные щупы-зонды, соединённые с клеммами вольтметра, т.е. на оси OX отмечают точки A, B, C, …, начиная отсчёт от электрода. Затем вводят в воду один из зондов в намеченную точку A на оси OX, а другой зонд передвигают в направлении оси OY, перпендикулярно к оси OX, и находят вторым зондом точки, эквипотенциальные точке A. Расположение стрелки нуль-индикатора (вольтметра) против нуля свидетельствует о том, что разность потенциалов между точками, в которых расположены зонды, равна нулю.

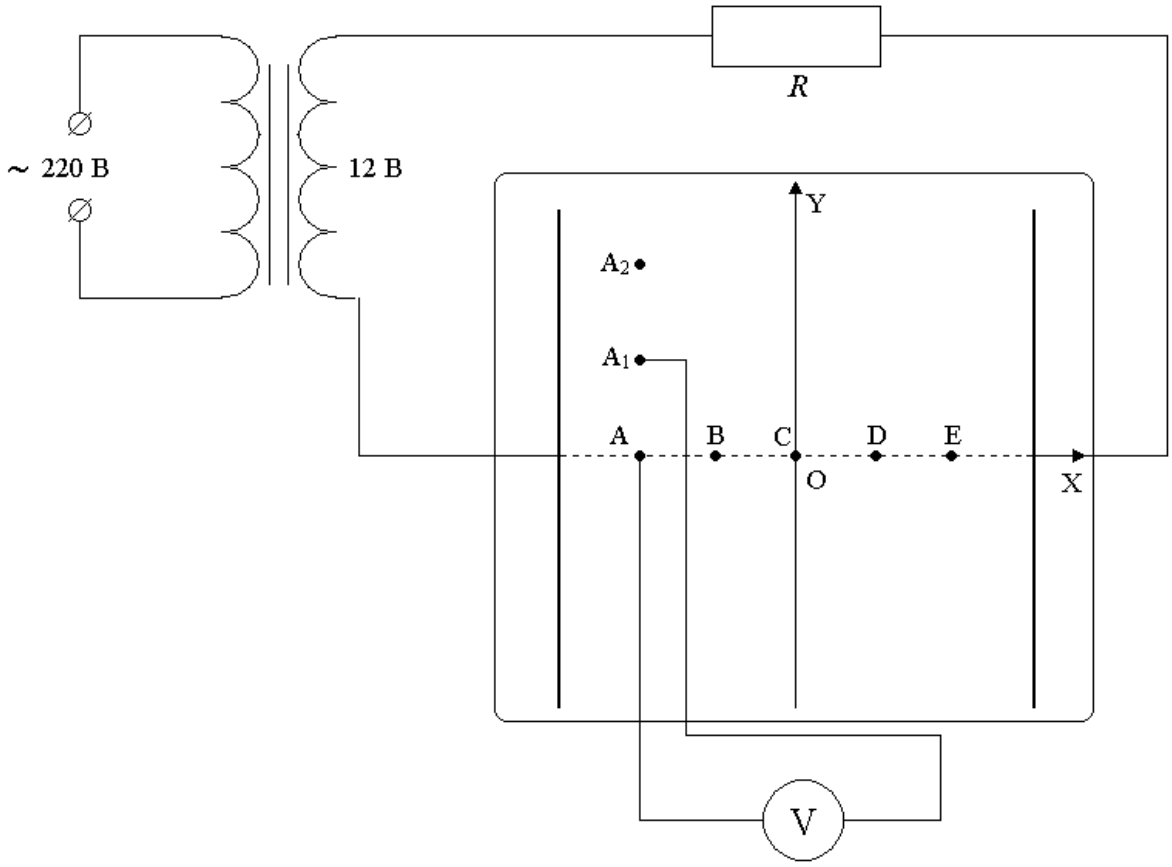


Рис. 13.1

Так отыскивают для точки A (через каждые 2 − 3 см) эквипотенциальные точки A_1, A_2, A_3, … . Координаты этих точек заносят в таблицу.

Совокупность точек A_1, A_2, A_3, … даёт возможность построить на миллиметровке эквипотенциальную линию, проходящую через точку A. Таким же образом находят эквипотенциальные линии, проходящие через точки B, C, D, …, которые наносят на миллиметровку.

Задание 1. По пространственным эквипотенциальным линиям однородного поля произвести расчёт напряжённости и плотности заряда на пластинах.

Задание 2. Исследовать поле между пластинами при внесении в него незаряженного металлического кольца.

Задание 3. Исследовать поле, созданное двумя коаксиальными цилиндрами. Произвести расчёт напряжённости ряда точек этого поля.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим полем?
2. Почему электростатическое поле для исследования можно моделировать электрическим?
3. Что называется эквипотенциальной поверхностью?
4. Что называется напряжённостью электрического поля?
5. Объяснить картины исследованных полей.

Лабораторная работа № 14

ИЗУЧЕИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА

Цель работы - приобрести навыки работы с осциллографом, наблюдать синусоидальные сигналы, выпрямленное напряжение, затухающие колебания и фигуры Лиссажу.

Необходимое оборудование - электронный осциллограф, звуковой генератор, колебательный контур и однополупериодный выпрямитель на панели.

Краткие теоретические сведения

Электронный осциллограф − это прибор для визуального наблюдения, измерения и записи разнообразных электронных процессов.

Условно осциллографы можно разделить на такие группы:

1) лабораторные универсальные с чувствительностью более 100 мм/В;
2) простые осциллографы с чувствительностью 10 … 100 мм/В;

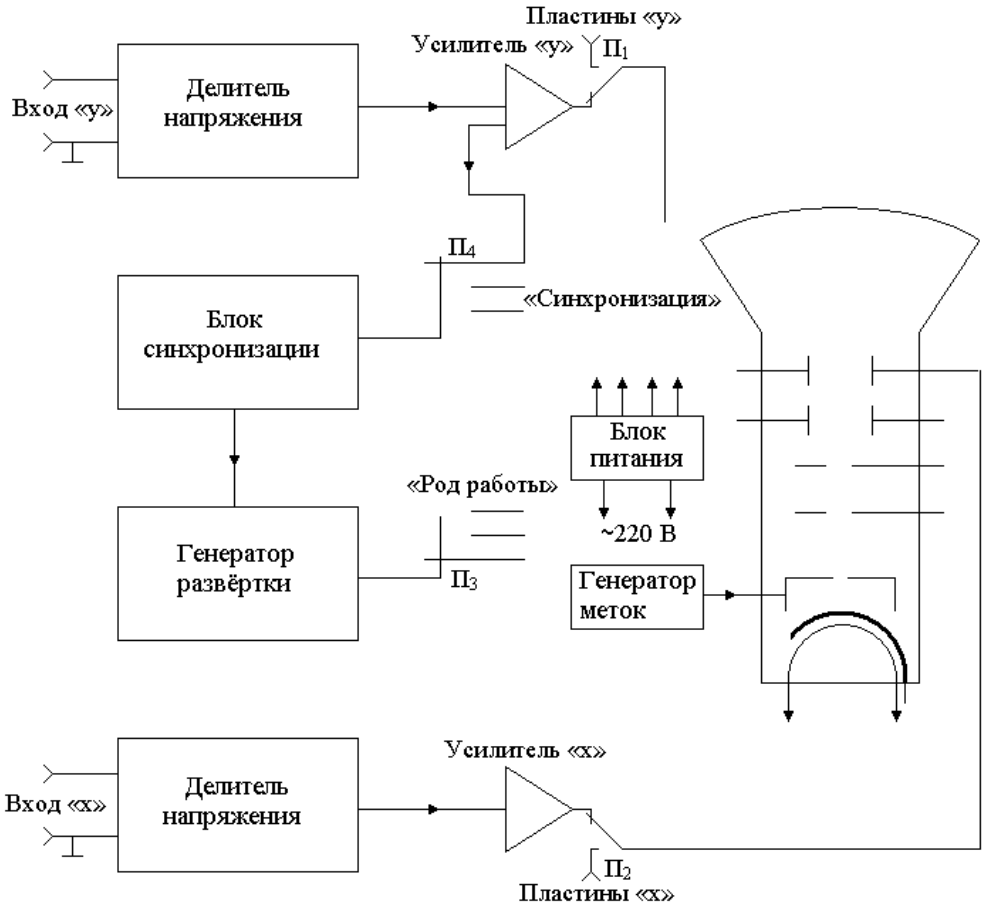


Рис. 14.1.

3) осциллографы для наблюдения медленных процессов (с большим полем свечения);
4) импульсные осциллографы для наблюдения кратковременных процессов.

Осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки, генератора развёртки, блока синхронизации, двух усилителей, блока питания. В некоторых осциллографах имеется генератор меток времени. Принципиальная схема осциллографа показана на рис. 14.1.

Осциллографы применяются во многих отраслях науки и техники, в частности, в электро- и радиотехнике, механике, акустике, медицине, биологии и др. Осциллограф даёт возможность наблюдать процессы длительностью 10^{-8} … 10^{-7} с.

Измерительным элементом электронного осциллографа служит электронно-лучевая трубка, внутри которой создаётся электронный пучок, попадающий на экран трубки. Различают два типа трубок: с электростатической фокусировкой электронного пучка и с магнитной. Упрощённая схема электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) изображена на рис. 14.2. На нём показана и простейшая схема управления электронным пучком.

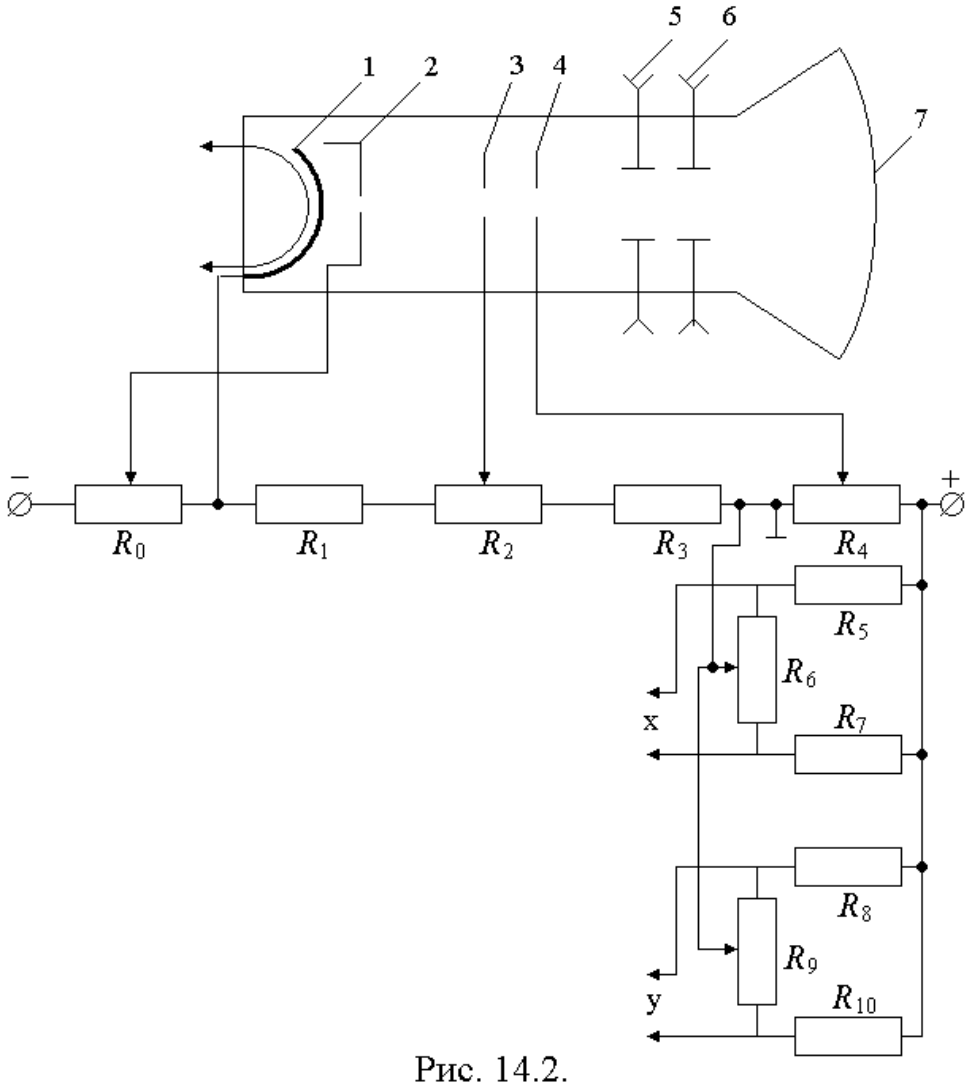


Рис. 14.2.

Основные характеристики ЭЛТ: чувствительность, область линейности, скорость перемещения «пятна» по экрану, ускоряющее напряжение, длительность послесвечения.

Система, создающая узкий пучок электронов, называется «электронной пушкой». Для излучения электронов лишь в одном направлении катод 1 изготовляют в виде небольшого металлического цилиндра с отдельным покрытием торца. Покрытие наносится из материала, обладающего малой работой выхода. Металлический цилиндр насажен на фарфоровую трубку, в середине которой размещена подогревательная спираль. Вследствие явления термоэлектронной эмиссии разогретый катод эмитирует большое число электронов в прикатодное пространство. Управление электронным пучком осуществляется делителем напряжения, состоящим из резисторов R_0, R_1, R_2, R_3, R_4. Управляющий электрод 2 предназначен для регулирования количества электронов в электронном пучке (регулятор яркости R_0). Потенциал управляющего электрода относительно катода – отрицательный, поэтому для того, чтобы вырывать электроны

узким пучком через малое отверстие диафрагмы, необходим большой потенциал анодов. Два цилиндрических анода 3 и 4 осуществляют также дополнительную фокусировку (регулятор R_2 − «фокус») и ускорение сформированного электронного пучка. Подстроечный резистор R_4 даёт возможность установить потенциал второго анода равным потенциалу пластин при неотключенном луче на экране осциллографа. Второй анод 4 имеет больший потенциал, чем первый. Вследствие этого между анодами образуется электрическое поле. Форма силовых линий поля и инерция электронов позволяют им достигать экрана, не оседая на пластинах. Полное напряжение, которое подаётся на анод, для обычных осциллографов колеблется в пределах 500 … 5000 В.

Система пар отклоняющих пластин 5 и 6, расположенных взаимно перпендикулярно, предназначена для отклонения пучка электронов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Смещение пучка электронов осуществляется подачей на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины напряжений от делителей R_8, R_9, R_{10}, R_5, R_6, R_7. Сопротивления R_5 и R_7 одинаковы, поэтому при среднем положении ползунка резистора R_6 (на панели осциллографа − это регулятор «смещение x») потенциал на обеих пластинах «x» будет одинаков и луч не смещается. При смещении ползунка резистора потенциал одной из пластин уменьшается, другой − увеличивается на такую же величину. Между пластинами возникает поле, которое и отклоняет луч в горизонтальной плоскости. Аналогично происходит и отклонение луча в вертикальной плоскости (регулятор на панели осциллографа − «смещение y»). Величина смещения зависит от напряжения, приложенного к пластинам, а также и от скорости движения электронов. Например, если одно из напряжений пропорционально переменной величине «x», а другое − величине «y», то на экране осциллографа световое пятно будет рисовать некоторую фигуру в прямоугольной системе координат. Для получения фигур Лиссажу нужно к обеим парам пластин подвести синусоидальные напряжения разной частоты.

Экран ЭЛТ 7 представляет собой поверхность дна баллона, покрытую тонким слоем люминофора (сульфидом цинка), способного светиться под действием электронного пучка. Чувствительность самой ЭЛТ мала, поэтому для исследования слабых сигналов осциллографы имеют усилители на входах «x» и «y». Но в осциллографе предусмотрена и непосредственная подача сигнала на пластины (переключатели $П_1$ и $П_2$). Входные гнёзда пластин расположены на тыльной стороне прибора.

Важным элементом осциллографа является генератор развёртки. Его назначение − обеспечить равномерную развёртку электронного луча на экране ЭЛТ. Как правило, напряжение развёртки, используемое в осциллографах, изменяется по линейному закону. Поэтому генератор развёртки обеспечивает пилообразную форму изменения напряжения (рис. 14.3).

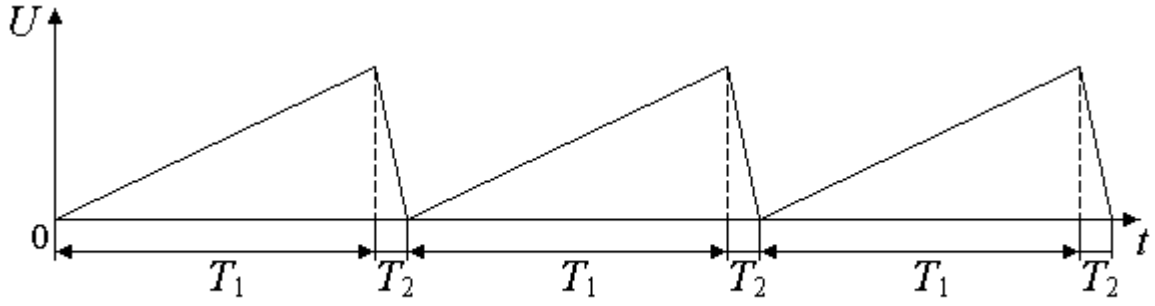


Рис. 14.3.

Для этого напряжения характерно то, что в течение относительно большого промежутка времени T_1 возрастание напряжения пропорционально времени, а спад − практически мгновенный ($T_2 << T_1$).

В связи с этим, электронный пучок отклоняется в одном направлении слева направо пропорционально времени (прямой или рабочий ход), а потом мгновенно возвращается в исходное положение (обратный ход). При обратном ходе луч гасится и на

экране наблюдается лишь прямой ход. Если период развёртки большой, то движение светящейся точки хорошо заметно на экране. При мало периоде эти движения очень часто повторяются и глаз уже не в состоянии различать перемещение луча − на экране наблюдается непрерывная линия.

Период развёртки можно плавно регулировать ручкой «частота плавно». Режим работы устанавливается переключателем $П_3$ «Род работы».

Исследуемый сигнал подаётся на вертикально отклоняющие пластины, а на горизонтально отклоняющие пластины подаётся пилообразно изменяющееся напряжение. Если частота исследуемого напряжения равна f, а частота напряжения развёртки f_0, то на экране получим определённую кривую исследуемого сигнала. Изображение исследуемого сигнала на экране неподвижно тогда, когда частоты исследуемого сигнала и пилообразного напряжения кратны друг другу.

При невыполнении этого условия изображение на экране будет двигаться.

Для согласования частоты исследуемого сигнала с частотой генератора развёртки применяется синхронизация частоты генератора развёртки. Синхронизация может осуществляться непосредственно от сети, внешнего источника и от внутреннего источника (переключатель $П_4$ «синхронизация»).

Питание осциллографа осуществляется от специального блока, в состав которого входят ряд устройств, обеспечивающих нормальную работу всех систем.

Прядок выполнения работы

Подготовка осциллографа к работе

1. Ручки «Фокус», «Ось х», Ось у», «Яркость» перевести в среднее положение
2. Установить переключатель «Синхронизация» в положение «Внутр».
3. Переключатель «Ослабление» перевести в положение 1 : 100; ручку «Усиление» в левой части панели (вертикальное усиление) − в среднее положение.
4. Ручку «Усиление», находящуюся в правой части панели (горизонтальное усиление), установить в положение 1 − 3; органы управления генератора развёртки − в среднее положение.
5. Тумблер «Сеть» перевести в верхнее положение, при этом загорится сигнальная лампочка. Через 1 … 2 мин после прогрева прибора на экране появится светящаяся горизонтальная линия.
6. Вращая ручки «Ось х» и «Ось у», установить светящуюся линию точно в центр экрана.
7. Регулируя «Яркость», уменьшить яркость горизонтальной линии до необходимой.
8. Поворачивая регулятор «Фокус», добиться чёткого изображения горизонтальной линии. Осциллограф к работе готов.

Задание 1. Наблюдение синусоидального напряжения.

1) Подключить выходные зажимы звукового генератора ГЗ-1 к вертикальному входу осциллографа.

2) Подготовить к работе генератор ГЗ-1, для чего

а) ручку «Напряжение выхода» вывести в среднее положение;

б) поставить большой и малый лимбы ручки «Установка частоты» на нуль;

в) включить генератор с помощью тумблера «Сеть», при этом загорится сигнальная лампочка;

г) после включения дать прибору прогреться в течение 10 … 15 мин;

д) медленно поворачивать ручку «Установка нуля» до тех пор, пока стрелка

вольтметра-индикатора не станет на нуль;

е) ручку «Напряжение выхода» установить в крайнее левое положение.

3. Установить частоту генератора 500 Гц с помощью ручки «Установка частоты».

4. Установить по вольтметру-индикатору генератора с помощью ручки «Напряжение выхода» напряжение 3 … 6 В.

5. Переключателем «Диапазон работы» и ручкой «Частота плавно» добиться стабильности изображения, а ручкой «Амплитуда синхронизации» устранить проскальзывание изображения, т.е. сделать его неподвижным; добиться получения 2 − 4 периодов исследуемого напряжения на экране осциллографа рис. 14.4.

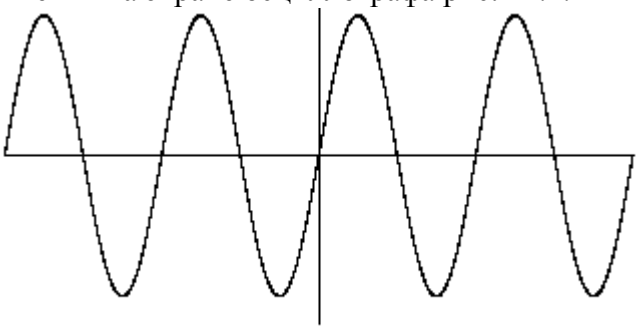


Рис. 14.4.

6. Зарисовать полученную осциллограмму.

7. Построить аналогичную осциллограмму на компьютере с помощью программы, данной в приложении.

8. Получить устойчивое изображение синусоидального напряжения частотой 3000 Гц.

9. Определить с помощью осциллографа напряжение сигнала, предварительно проведя калибровку.

Задание 2. Наблюдение сигнала на выходе однополупериодного выпрямителя

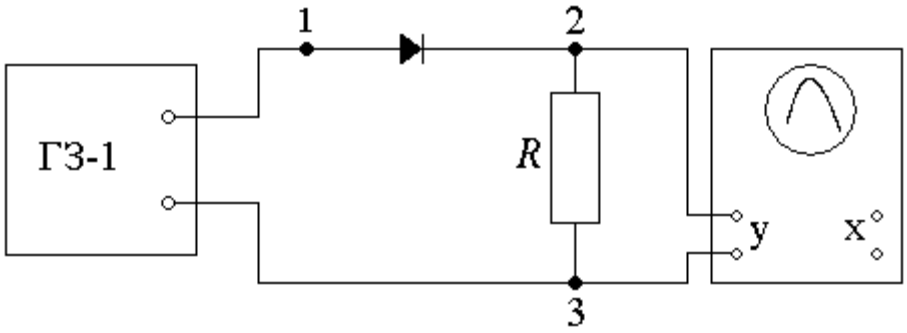


Рис. 14.5.

1. При выключенном напряжении выхода генератора подключить с помощью соединительных проводов выходы «Выход» генератора к зажимам 1 и 3 измерительной панели (зажим 3 должен быть соединён с выводом «⊥» генератора). Затем зажимы 2 и 3 измерительной панели соединить с выводами «Вход» и «Земля» осциллографа, причём клемма 3 должна быть соединена с клеммой «Земля». Схема, в соответствии с которой производится наблюдение, показана на рис. 14.5.

2. Установить напряжение генератора 3 … 6 В произвольной частоты.

3. Добиться устойчивого изображения сигнала (рис. 14.6) в соответствии с изложенной методикой.

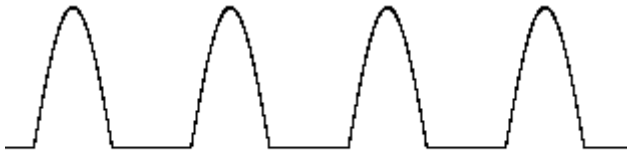


Рис. 14.6.

4. Зарисовать полученную осциллограмму.

5. Построить аналогичную осциллограмму на компьютере с помощью программы, данной в приложении.

6. Выключить генератор ГЗ-1.

Задание 3. Наблюдение затухающих колебаний *RLC* −контура

1. Соединить зажим 3 измерительной панели с выводом «Земля» осциллографа; зажим 4 − с выводами «Вход» (вертикальный) и «Генератор пилообразного напряжения», в соответствии со схемой, изображённой на рис. 14.7.

2. Переключатель «Ослабление» перевести в положение 1 : 1.

3. Органами управления добиться устойчивого изображения затухающих колебаний на экране осциллографа (рис. 14.8)

4. Зарисовать полученную осциллограмму.

5. Построить аналогичную осциллограмму на компьютере с помощью программы, данной в приложении.

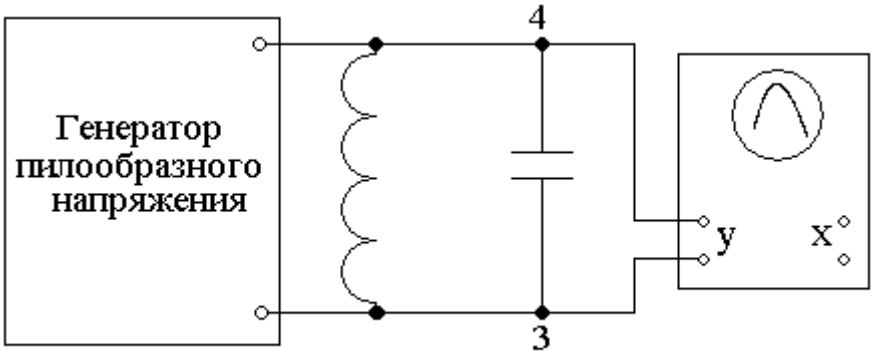


Рис. 14.7.

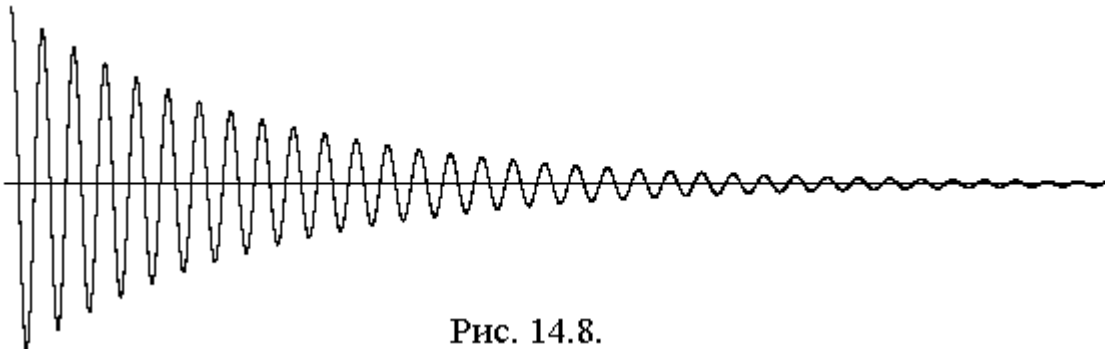


Рис. 14.8.

Задание 4. Наблюдение фигур Лиссажу

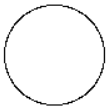
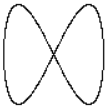
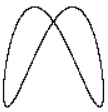
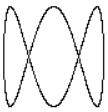
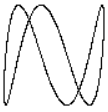
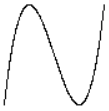
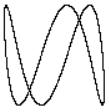
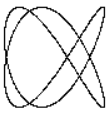
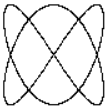
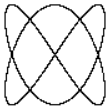
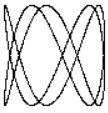
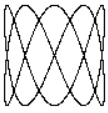
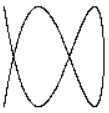
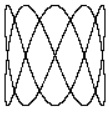
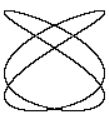
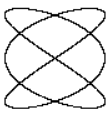
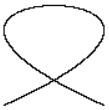
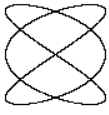
1. Подать на одну пару отклоняющих пластин осциллографа напряжение 6,3 В частотой 50 Гц (от гнезда «Контрольный сигнал», а на другую − от звукового генератора.

Меняя частоту генератора, наблюдать и зарисовывать получающиеся фигуры Лиссажу (табл. 13.1). Указать, при каких соотношениях частот они получаются (рекомендуемые соотношения частот 50 : 50; 50 : 100; 50 : 150; 50 : 200).

2. Построить аналогичную осциллограмму на компьютере с помощью программы, данной в приложении.

3. Проверить градуировку звукового генератора. Составить таблицу поправок.

Таблица 14.1.

$f_x : f_y$	0^0	45^0	90^0	135^0
1 : 1				
1 : 2				
1 : 3				
2 : 3				
2 : 5				
3 : 2				

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия ЭЛТ.
2. Основные блоки осциллографа и их назначение.
3. Принцип работы генератора развёртки.
4. Как получают на экране фигуры Лиссажу?
5. Как по фигуре Лиссажу определить соотношение частот?

Лабораторная работа № 15

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы - изучить закон Ома для последовательной цепи переменного тока с омическим, ёмкостным и индуктивным сопротивлениями для уяснения сдвига фаз между током напряжением; экспериментально проверить закон Ома; научиться строить векторные диаграммы и применять их для характеристики переменного тока.

Необходимое оборудование - регулятор напряжения, реостат, катушка индуктивности, батарея конденсаторов, миллиамперметр, четыре вольтметра.

Краткие теоретические сведения

Если к концам проводника с омическим сопротивлением приложена ЭДС, значение которой в каждый момент времени определяется уравнением $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$, где ε_0 – амплитуда; ω – круговая частота, то в нём возникает переменный электрический ток, сила которого в данный момент времени определяется по закону Ома:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t. \quad (15.1)$$

В этом случае ток и напряжение совпадают по фазе.

Если в цепи есть ещё и катушка индуктивности, характеризуемая индуктивностью L и сопротивлением X_L, то под действием той же ЭДС возникает ток:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (15.2)$$

где амплитудная сила тока

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + X_L{}^2}}, \quad (15.3)$$

X_L – индуктивное сопротивление

$$X_L = L\omega; \quad (15.4)$$

ω – круговая частота, $\omega = 2\pi\nu$; ν – линейная частота.

В этом случае ток отстаёт по фазе от напряжения на угол φ:

$$tg\varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{L\omega}{R}. \quad (15.5)$$

Если вместо катушки в цепь ввести конденсатор ёмкостью C, то под действием той же ЭДС в цепи возникает ток

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (15.6)$$

При этом амплитудная сила тока

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + X_C{}^2}}, \quad (15.7)$$

где X_C – ёмкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{C\omega}. \quad (15.8)$$

В этом случае ток опережает напряжение на φ:

$$tg\varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR}. \qquad (15.9)$$

Если цепь состоит из последовательно включенных нагрузок: активной, ёмкостной и индуктивной, то в цепи под действием той же ЭДС возникает ток

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \qquad (15.10)$$

где $I_0 = \frac{\varepsilon_0}{Z}$ или

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \qquad (15.11)$$

где полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (15.12)$$

Формула (15.11) выражает закон Ома для последовательной цепи переменного тока. При этом угол сдвига фаз между током и напряжением

$$tg\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \qquad (15.13)$$

В приведенных формулах I_0 и ε_0 – максимальные (амплитудные) токи и напряжения. Приборы показывают эффективные значения, которые в $\sqrt{2}$ раз меньше максимальных, т.е.

$$I_э = \frac{I_0}{\sqrt{2}},\ \varepsilon_э = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}},\ I_э = \frac{\varepsilon_э}{Z}.$$

Преобразуем формулу следующим образом:

$$\varepsilon_э^2 = I_э^2 Z^2 = I_э^2 \left[R^2 + (X_L - X_C)^2\right];$$

$$\varepsilon_э^2 = (I_э R)^2 + (I_э X_L)^2 - 2I_э^2 X_L X_C + (I_э X_C)^2,$$

или

$$U_{общ}^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2. \qquad (15.14)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь по схеме (рис. 15.1).
2. Провести измерения при трёх различных напряжениях.
3. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 15.1.

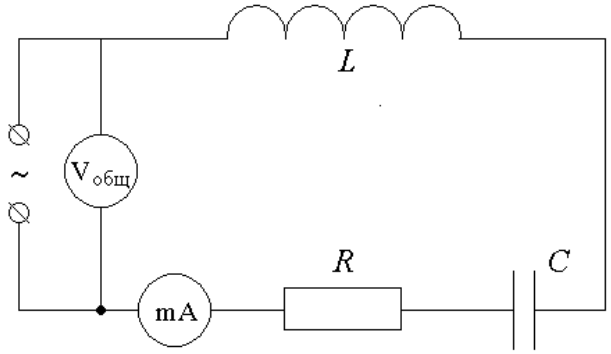


Рис. 15.1

Таблица 15.1.

№ п/п	$U_{общ}$		I		$Z_{экс}$, Ом	$Z_{ср}$, Ом	$Z_{теор}$, Ом	ΔZ, Ом	$\frac{\Delta Z}{Z_{теор}}$
	дел	В	дел	А					

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислить все параметры переменного тока.
2. Рассмотреть цепь с омическим сопротивлением.
3. Рассмотреть цепь с индуктивным сопротивлением. Обосновать сдвиг фаз.
4. Рассмотреть цепь с ёмкостным сопротивлением. Обосновать сдвиг фаз.
5. Нарисовать график зависимости тока и напряжения от времени для различных нагрузок (индуктивной, активной, ёмкостной).

Лабораторная работа № 16

ИЗУЧЕНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНФОРМАТОРА

Цель работы - изучить принцип действия и устройство однофазного трансформатора, определить коэффициент трансформации и КПД трансформатора.

Необходимое оборудование - трансформатор, вольтметр переменного тока на 250 В, вольтметр переменного тока на 150 В, амперметры переменного тока на 2 А.

Краткие теоретические сведения

Трансформатор − это прибор, служащий для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток такого же или иного напряжения посредством магнитного поля при сохранении частоты тока.

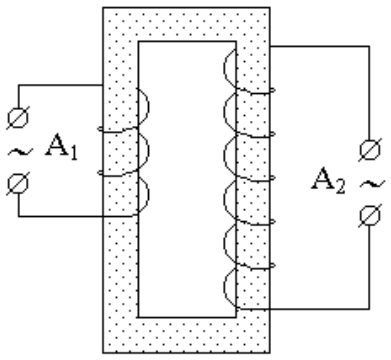


Рис. 16.1

Простейший трансформатор состоит из двух обмоток, намотанных на общий замкнутый железный сердечник (рис. 16.1).

В повышающем трансформаторе первичная обмотка A_1 состоит из небольшого числа витков относительно толстого провода, вторичная обмотка A_2 − из большого числа витков более тонкого провода.

Принцип действия трансформатора основан на использовании явления электромагнитной индукции. Ток, проходящий через первичную обмотку A_1, создаёт переменный поток магнитной индукции Φ_0, который почти целиком сосредоточен внутри сердечника, и, следовательно, практически полностью пронизывает

витки вторичной обмотки.

При разомкнутой вторичной обмотке первичная обмотка является частью цепи с некоторыми омическим и индуктивным сопротивлениями. Если омическое сопротивление очень мало по сравнению с индуктивным, его влиянием можно пренебречь. Тогда ЭДС ε_1, действующая в первичной обмотке, численно равна и обратна по знаку возникающей в ней ЭДС самоиндукции ε_{si}:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_{si}.$$

В каждом витке первичной обмотки возникает ЭДС самоиндукции, $-\frac{d\Phi_0}{dt}$, откуда $\varepsilon_{si} = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt}$, где N_1 − число витков первичной обмотки. Отсюда ЭДС, действующая в первичной обмотке,

$$\varepsilon_1 = N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} \approx U_1, \tag{16.1}$$

поскольку практически ЭДС находят, измеряя напряжение и на концах обмоток.

Так как этот же поток Φ пронизывает вторичную обмотку, то в каждом её витке возникает ЭДС индукции $-\frac{d\Phi_0}{dt}$. Во всех витках вторичной обмотки возникает ЭДС

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} \approx U_2. \tag{16.2}$$

Сравнивая (16.1) и (16.2), получаем, что ЭДС индукции, возникающая во вторичной обмотке,

$$\varepsilon_2 = -\frac{N_2}{N_1}\varepsilon_1. \tag{16.3}$$

Таким образом, трансформатор повышает ЭДС во вторичной обмотке по сравнению с ЭДС первичной обмотки, если $N_2 > N_1$. Знак «−» указывает на то, что ЭДС в первичной и вторичной обмотках трансформатора противоположены по фазе.

Обычно у трансформаторов коэффициент самоиндукции первичной обмотки достаточно велик. Это приводит к тому, что при разомкнутых вторичных цепях в первичной цепи, в силу её большого индуктивного сопротивления, течёт малый ток I_0 (ток холостого режима), отстающий от напряжения U_1 почти на $\pi/2$. Создаваемый этим током магнитный поток Φ_0 концентрируется в магнитопроводе и пронизывает все обмотки трансформатора, индуцируя в первичной обмотке ЭДС самоиндукции (16.1).

Таким образом, при холостом ходе ЭДС самоиндукции в первичной обмотке практически компенсирует приложенное напряжение. Потребляемая трансформатором энергия расходуется только на компенсацию потерь энергии, которые удаётся снизить до минимума.

К основным видам потерь энергии в трансформаторе относят потери на ленц-джоулево тепло в обмотках («потери в меди»). Для их уменьшения провод для обмоток берётся с малым удельным сопротивлением (как правило, медный). Потери на рассеяние магнитного потока существенно снижают, применяя замкнутый ферромагнитный сердечник. Это, однако, приводит к появлению новых источников потерь, связанных с индуцированием в сердечнике токов Фуко и работой поля, идущей на перемагничивание сердечника («потери в железе»). Токи Фуко уменьшают, набирая сердечники трансформаторов из пластин, которые изолируют друг от друга, предельно увеличивая сопротивление в плоскости, перпендикулярной магнитному потоку. Для уменьшения потерь на перемагничивание сердечники изготовляют из магнитомягких сортов ферромагнитных материалов, например, сортов железа с минимальным количеством

примесей, нелегированных электротехнических сталей или пермаллоя (железоникелевый сплав, содержащий от 36 % до 85 % никеля и железо). Таким образом, удаётся повысить КПД трансформатора до значений, превышающих 95 %.

Магнитный поток Φ_0 пронизывает вторичные обмотки, индуцируя в них ЭДС пропорциональное числу витков (16.2).

Отношение напряжений в обмотках

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k, \tag{16.4}$$

где *k* называют коэффициентом трансформации.

Векторы $\vec{U}_1, \vec{\varepsilon}_1, \vec{\varepsilon}_2, \vec{\Phi}_0$ определяют диаграмму холостого тока на рис. 16.2. При замыкании вторичной цепи в ней возникает ток I_2, сдвинутый по фазе по отношению к $\vec{\varepsilon}_2$, который создает магнитный поток $\vec{\Phi}_2$, направленный навстречу потоку $\vec{\Phi}_0$. Это приводит к уменьшению индуктивного сопротивления первичной катушки и к увеличению в ней тока I_1. Одновременно растет и магнитный поток $\vec{\Phi}_1$, создаваемый током первичной обмотки. Нарастание будет иметь место до тех пор, пока суммарный поток не примет значение близкое к первоначальному $\vec{\Phi}_0$. Трансформатор саморегулируется, поддерживая магнитный поток в сердечнике постоянным.

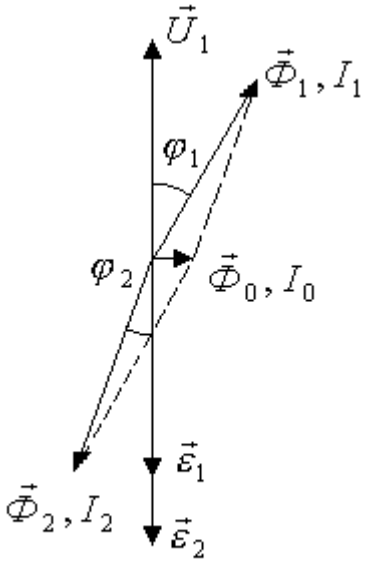


Рис. 16.2

При нормальной нагрузке трансформатора углы φ_1 и φ_2 невелики и мощность, потребляемая вторичной обмоткой приближается к величине, определяемой к.п.д. трансформатора, т.е.

$$U_2 I_2 \approx U_1 I_1. \tag{16.5}$$

Отсюда следует, что чем меньше витков имеет вторичная обмотка, тем больший ток с неё можно взять. Соответственно, обычно и сечение проводов обмоток стараются рассчитывать под возможные значения тока в них: чем меньше витков, тем больше сечение провода и наоборот.

КПД трансформатора называется величина, показывающая отношение энергии (мощности), выделяемой на вторичной обмотке, к энергии (мощности), потребляемой первичной:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2 I_2 t}{U_1 I_1 t} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}. \tag{16.6}$$

Коэффициент трансформации определяется при разомкнутой цепи вторичной обмотки, а КПД вычисляется только по данным для нагруженного трансформатора.

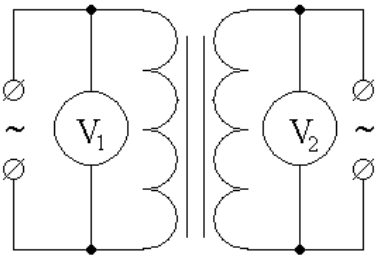


Рис. 16.3

Порядок выполнения работы

Определение коэффициента трансформации

1. Собрать цепь по схеме (рис. 16.3), подключив вольтметр на 250 В к первичной обмотке, а вольтметр на 150 В − к вторичной.
2. Подключить первичную обмотку к сети и измерить напряжения U_1 и U_2.

3. Результаты занести в таблицу. По формуле (16.4) рассчитать коэффициент трансформации.

Определение КПД трансформатора

1. Собрать цепь по схеме (рис. 16.4), подсоединив во вторичную обмотку вольтметр на 150 В, амперметр на 2 А и ламповый реостат; в первичную обмотку − вольтметр на 250 В, амперметр на 2 А.

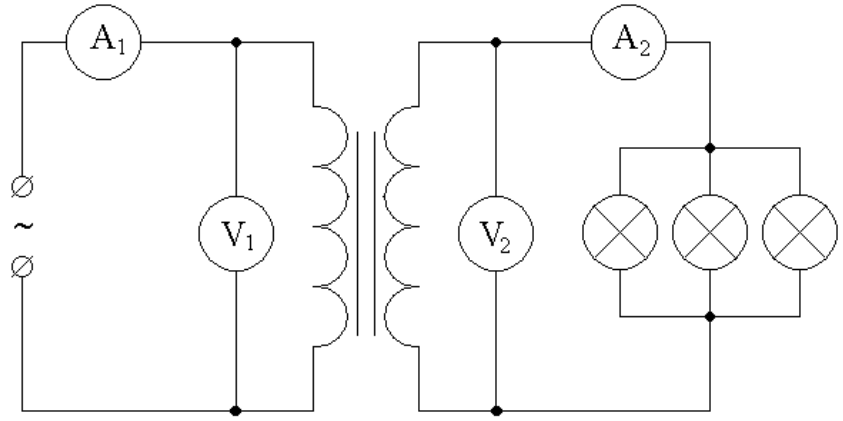


Рис. 16.4

2. Подключив трансформатор к сети переменного тока, записать показания приборов, меняя нагрузку во вторичной обмотке.

3. Результаты измерений занести в таблицу. Пользуясь (16.6), рассчитать КПД трансформатора.

4. Определить коэффициент трансформации и КПД трансформатора в виртуальной измерительной схеме (рис. 16.5).

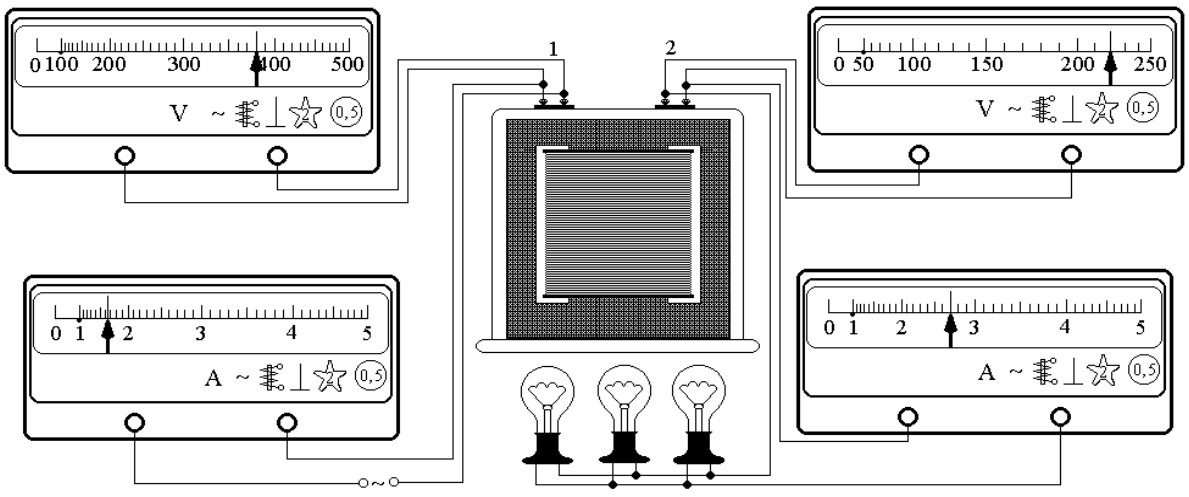


Рис. 16.5.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы трансформатора.
2. Чем отличается работа ненагруженного и нагруженного трансформаторов?
3. В каком соотношении находятся силы токов, текущих в первичной и вторичной обмотках трансформатора?
4. Объяснить векторные диаграммы нагруженного и ненагруженного трансформаторов.

Лабораторная работа №17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА С ПОМОЩЬЮ ДВУХ ВОЛЬТМЕТРОВ

Цель работы - изучить закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, и для замкнутой цепи, овладеть одним из способов измерения ЭДС, углубить знания об устройстве и применении вольтметра.

Необходимое оборудование - источник ЭДС постоянного тока, два вольтметра.

Краткие теоретические сведения

В каждом источнике тока происходит перераспределение электрических зарядов. В химических источниках (аккумуляторы, гальванические элементы) перераспределяются ионы. Причины, которые обуславливают это явление и поддерживают постоянный ток в цепи, − химические реакции. Силы, совершающие эту работу, называются сторонними, а поле, созданное ими, − полем сторонних сил. Источник сторонних сил в цепи постоянного тока выполняет работу по перемещению свободных носителей зарядов против сил электростатического поля. Сторонние силы характеризуются работой, которую они выполняют.

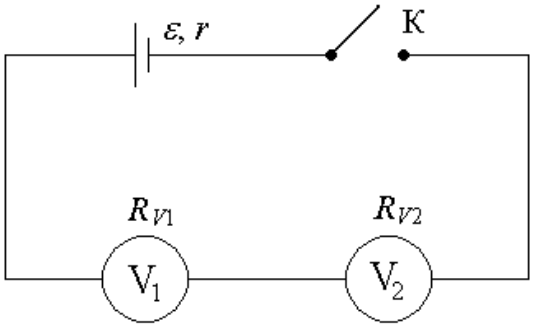


Рис. 17.1

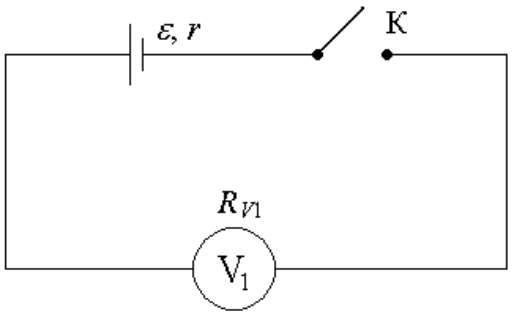


Рис. 17.2

Физическая величина, равная работе $A_{стор}$ сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль всей замкнутой электрической цепи, называется электродвижущей силой (ЭДС)

$$\varepsilon = \frac{A_{стор}}{q}. \qquad (17.1)$$

Рассмотрим цепь, схема которой показана на рис. 17.1.

Сила тока в такой цепи по закону Ома

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{V1} + R_{V2} + r}, \qquad (17.2)$$

где R_{V1}, R_{V2} − соответственно сопротивления вольтметров, r − внутреннее сопротивление источника.

Показания вольтметров соответственно

$$U_1 = \frac{\varepsilon R_{V1}}{R_{V1} + R_{V2} + r}, \qquad (17.3)$$

$$U_2 = \frac{\varepsilon R_{V2}}{R_{V1} + R_{V2} + r}. \qquad (17.4)$$

Если к этому источнику тока подключить только один вольтметр (рис. 17.2), например V_1, то его показание будет

$$U = \frac{\varepsilon R_{V1}}{R_{V1} + r}. \qquad (17.5)$$

Решив систему уравнений (17.3) − (17.5), получим

$$\varepsilon = \frac{UU_2}{U - U_1}. \qquad (17.6)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь в соответствии со схемой (рис. 17.1).
2. Замкнуть ключ К. Снять показания вольтметров V_1 и V_2.
3. Собрать электрическую цепь в соответствии со схемой (рис. 17.2).
4. Замкнуть ключ К. Снять показания вольтметра V_1.
5. Пользуясь (17.6), рассчитать ЭДС источника.
6. Собрать электрическую цепь в соответствии со схемой (рис. 17.2), включив в неё вольтметр V_2.
7. Пользуясь (17.6), рассчитать ЭДС источника.
8. Сравнить полученные значения ЭДС.
9. Оценить погрешность определения каждого значения ЭДС.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия щелочного аккумулятора и сухого элемента.
2. Пояснить физический смысл ЭДС.
3. Что называют сторонними силами?
4. Какие существуют способы измерения ЭДС? Их достоинства и недостатки.

Лабораторная работа №18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ТОНКИХ ЛИНЗ

Цель работы - изучить: явление преломления, света на сферических поверхностях; приобрести навыки построения изображения предметов в тонких линзах и системах тонких линз, а также научиться определять фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз различными методами.

Необходимое оборудование - оптическая скамья, осветитель, набор линз, экран, миллиметровая линейка.

Краткие теоретические сведения

Сложную центрированную оптическую систему можно рассматривать как сумму простейших систем, каждая из которых образована одной преломляющей сферической поверхностью. Следовательно, сферические поверхности раздела двух оптически однородных сред представляют собой те элементы, из которых строится любая центрированная система.

Линзы – прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (сферическая, цилиндрическая или плоская), преломляющими световые лучи, способные формировать

оптические изображения предметов. По оптическим свойствам делятся на собирающие и рассеивающие.

Линза называется тонкой, если ее толщина значительно меньше радиусов поверхностей, ограничивающих линзу.

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется *главной оптической осью*.

Для всякой линзы существуют точка, называемая оптическим центром линзы, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходят через нее не преломляясь.

Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют *побочной оптической осью*. Если по выходу из линзы лучи сходятся, то они образуют действительное изображение. В случае, когда прошедшие через линзу лучи являются расходящимися, пересекаются не сами лучи, а их продолжения. Изображение тогда является мнимым.

Собирающая линза. Направим пучок параллельных световых лучей перпендикулярно линзе. Точка, в которой пересекаются после преломлений в собирающей линзе лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, называется *главным фокусом линзы* (т. F).

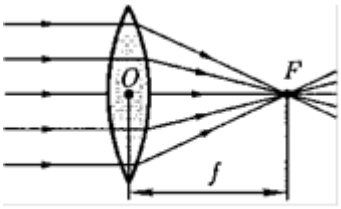


Рис. 18.1

Расстояние от центра до фокуса называется фокусным расстоянием *f*. Плоскости, проходящие через фокусы линзы перпендикулярно ее главной оптической оси, называются фокальными плоскостями. В фокальной плоскости пересекутся параллельные лучи, пущенные под углом к главной оптической оси. (рис. 18.1)

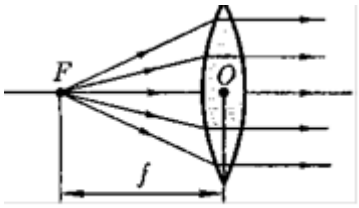


Рис. 18.2

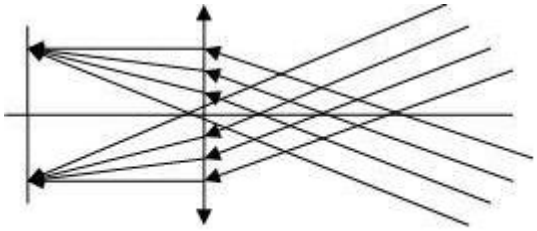


Рис. 18.3

Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в любой другой точке фокальной плоскости), получаем после преломления параллельные лучи (рис. 18.2,3,4,5).

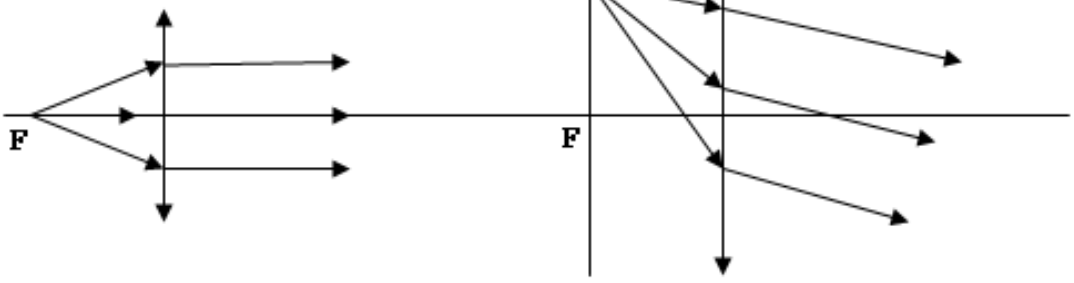


Рис. 18.4 Рис. 18.5

Если сместить источник дальше от линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение S' (рис. 18.6).

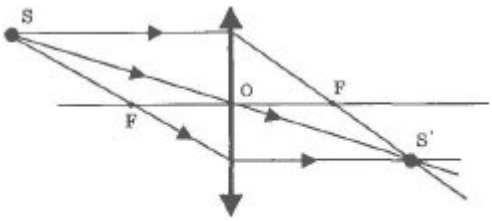


Рис. 18.6

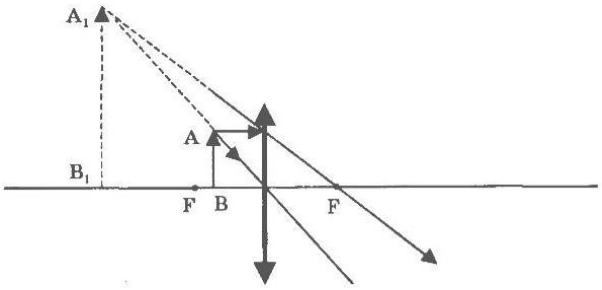


Рис. 18.7

Когда источник находится ближе фокуса, преломленные лучи расходятся, и изображение $S^{'}$ получается мнимым (рис. 18.7).

Рассеивающая линза. Направим пучок лучей, параллельных главной оптической оси, на выходе получаем расходящиеся лучи. Их продолжения пересекутся в главном фокусе рассеивающей линзы. Он является мнимым (рис. 18.8).

Чем ближе к линзе находится ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их.

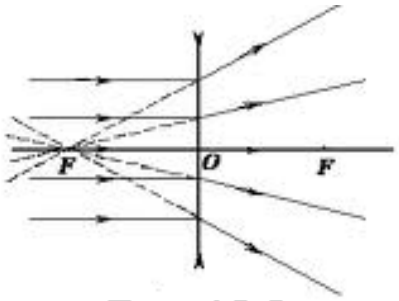


Рис. 18.8

Построение изображений в линзе удобно производить, если использовать любые два из трех «удобных» лучей (рис. 18.9):

1) луч, проходящий через оптический центр - не преломляется.
2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси, после преломления пройдет через фокус.
3) луч, проходящий через фокус – после преломления пойдет параллельно главной оптической оси.

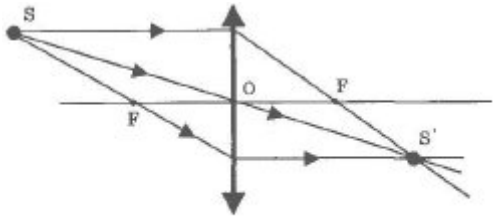


Рис 18.9

Для построения предметов, лежащих на главной оптической оси удобно использовать побочную оптическую ось и фокальную плоскость F (рис. 18.10).

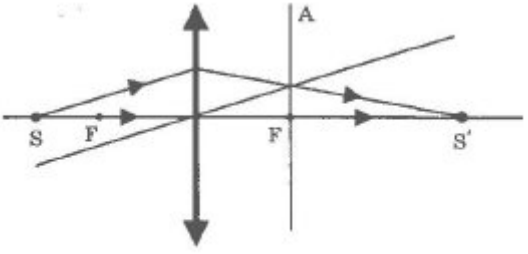


Рис. 18.10

Формула тонкой линзы связывает радиусы кривизны R_1 и R_2 поверхностей линзы с расстояниями a и b от линзы до предмета и его изображения. Пусть n_2 – абсолютный

показатель преломления линзы, а n_1 – окружающей среды. Тогда относительный показатель преломления $n = \frac{n_2}{n_1}$ и формула тонкой линзы:

$$(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)=\frac{1}{a}-\frac{1}{b}$$

Для выпуклой поверхности линзы R>0, вогнутой – R<0.

Фокусное расстояние линзы (a = ∞, то есть лучи падают параллельным пучком) b = f – фокусным расстоянием:

$$f=\frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)}$$

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой линзы

$$\Phi=\frac{1}{f}=(N-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

[Ф] = 1 дптр=1/м

Тогда

$$\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a_3}=\frac{1}{f} \qquad (18.1)$$

Для рассеивающей линзы расстояния f и b<0

Условимся отсчитывать расстояния от вершины преломляющей поверхности. Отрезки, которые откладываются против хода лучей, будем записывать со знаком "минус", по ходу лучей − со знаком "плюс".

Теория метода и экспериментальная установка

В работе предлагается с помощью оптической скамьи, предмета в виде освещенной сетки на матовом стекле, экрана и миллиметровой линейки определить тремя способами фокусное расстояние собирающей линзы и одним (четвертым) способом фокусное расстояние рассеивающей линзы.

1-й способ. Получают изображение сетки на экране, измеряют расстояния a_1 и a_3 и по формуле (18.1) рассчитывают фокусное расстояние собирающей линзы.

2-й способ. Используя определение линейного увеличения: $\beta=\frac{H}{h}$, где h − линейный размер сетки, H − линейный размер изображения, определяют β. Затем измеряют a_1 (или a_3) и, вычислив a_3 (или a_1 соответственно), по формуле (18.1) определяют f'.

3-й способ. Если расстояние A между предметом и его изображением на экране больше $4f'$, то можно получить два изображения предмета − увеличенное и уменьшенное − при неизменном положении предмета и экрана (рис. 18.11).

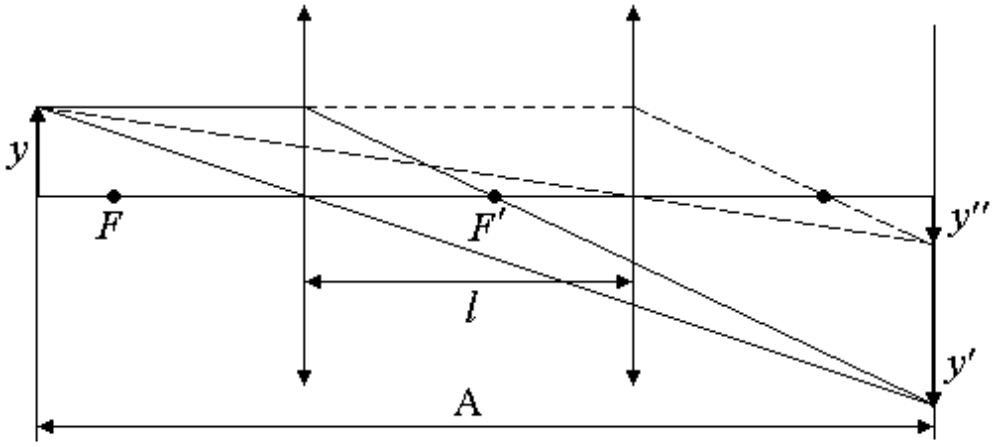


Рис. 18.11

В этом случае фокусное расстояние определяют по формуле

$$f' = \frac{A^2 - l^2}{4A}. \qquad (18.2)$$

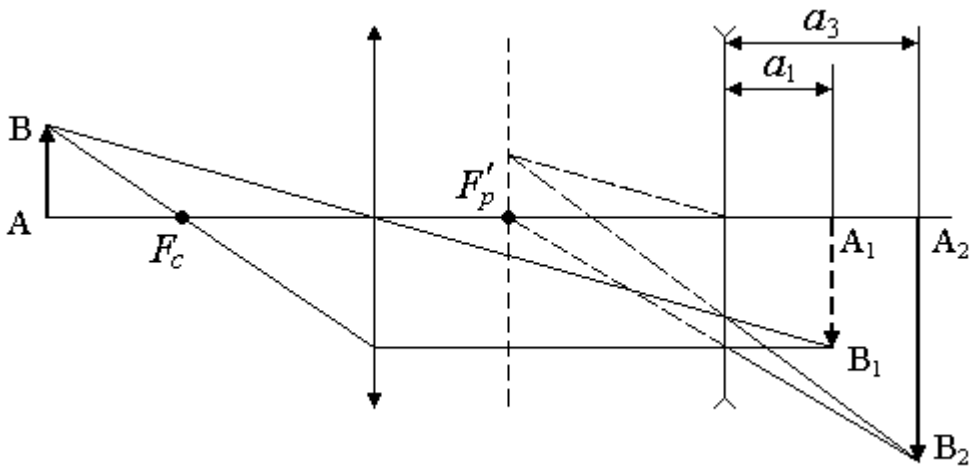


Рис. 18.12

4-й способ. Размещают между экраном и предметом собирающую линзу (рис. 18.12) и получают изображение в плоскости A_1B_1.

Затем между линзой и экраном размещает рассеивающую линзу так, что вторая фокальная плоскость ее проходит через точку F'_p. Перемещая экран, добиваются четкого изображения предмета $A_2 B_2$ (расположение предмета АВ и линзы O_1 остается прежним). После измерений отрезков a_1 и a_3 фокусное расстояние рассчитывают по формуле (18.1). Расчет можно проводить другим способом. Если предположить, что предмет находится в плоскости A_2B_2 , то его изображение получится в плоскости $A_1 B_1$, в этом случае отрезки a_1 и a_3 меняются местами, а знаки их будут отрицательными.

Порядок выполнения работы

1. Построить изображение в собирающей линзе предмета АВ, расположенного на различных расстояниях ($a_1 > 2f$, $a_1 = 2f$, $2f > a_1 > f$, $a_1 < f$).
2. Выполнить аналогичные построения в рассеивающей линзе.
3. Определить фокусные расстояния собирающей линзы 1, 2 и 3 способами.
4. Определить фокусное расстояние рассеивающей линзы 4-м способом.

Контрольные вопросы

1. Что произойдет с изображением, если закрыть половину линзы?
2. Какой метод определения фокусного расстояния является наиболее точным?
3. Какова связь между фокусным расстоянием и оптический силой линзы?

Лабораторная работа № 19

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Цель работы - изучить устройство лупы, зрительных труб, бинокля, научиться строить ход лучей в них и определять их важнейшие характеристики.

Необходимое оборудование - лупа, зрительная труба, бинокли, масштабная линейка.

Краткие теоретические сведения

Среди различных типов оптических приборов, предназначенных для увеличения угла зрения, широкое распространение получили простейшие оптические инструменты. К ним относятся очки, лупы, зрительные трубы, бинокли, микроскопы.

Лупа. Лупа даст увеличенное изображение малых предметов, находящихся на небольших расстояниях от глаза. Она представляет собой собирающую линзу, вблизи фокальной плоскости которой между фокусом и линзой размещается рассматриваемый предмет. Ход лучей в лупе изображен на рис. 19.1

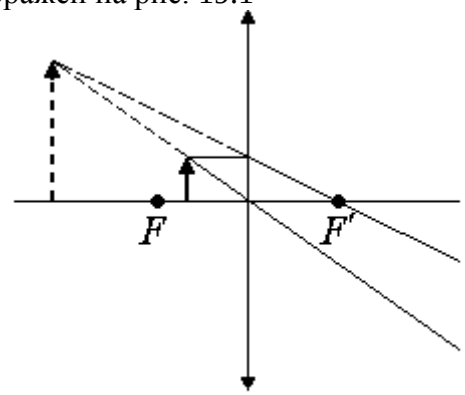


Рис. 19.1

Изображение в лупе получается мнимое, увеличенное, прямое.

Угловое увеличение лупы γ определяется как отношение тангенса угла, под которым видно изображение предмета через лупу, к тангенсу угла, под которым предмет виден с расстояния наилучшего видения невооруженный глазом.

На рис. 19.2.а рассматриваемый предмет расположен в фокальной плоскости лупы. В этом случае глаз наблюдателя должен быть аккомодирован на бесконечность. Тангенс угла φ ', под которым рассматривается предмет через лупу, определяется выражением

$$tg\varphi' = \frac{h}{f}. \qquad (19.1)$$

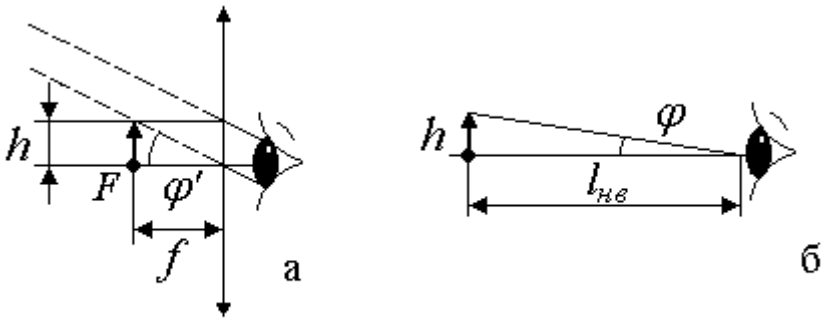


Рис. 19.2

Если этот же предмет расположен на расстоянии наилучшего зрения − 0,25 м (рис. 19.2.б), то тангенс угла φ, под которым, он виден невооруженным глазом, равен

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{h}{0{,}25}. \qquad (19.2)$$

Увеличение лупы

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg}\varphi'}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{0{,}25}{f}. \qquad (19.3)$$

Фокусное расстояние f лупы может быть определено путем измерения расстояния от лупы до точки, в которой фокусируется изображение удаленного источника света (лампы, Солнца и пр.).

Зрительная труба − прибор для визуального наблюдения удаленных предметов. Как оптическая система, зрительная труба входит составной частью в самые различные оптические инструменты − телескопы, бинокли, прицелы, дальномеры, перископы, гониометры и пр. Главными частями зрительной трубы является объектив и окуляр. На рис. 19.3 изображен ход лучей в зрительной трубе Кеплера.

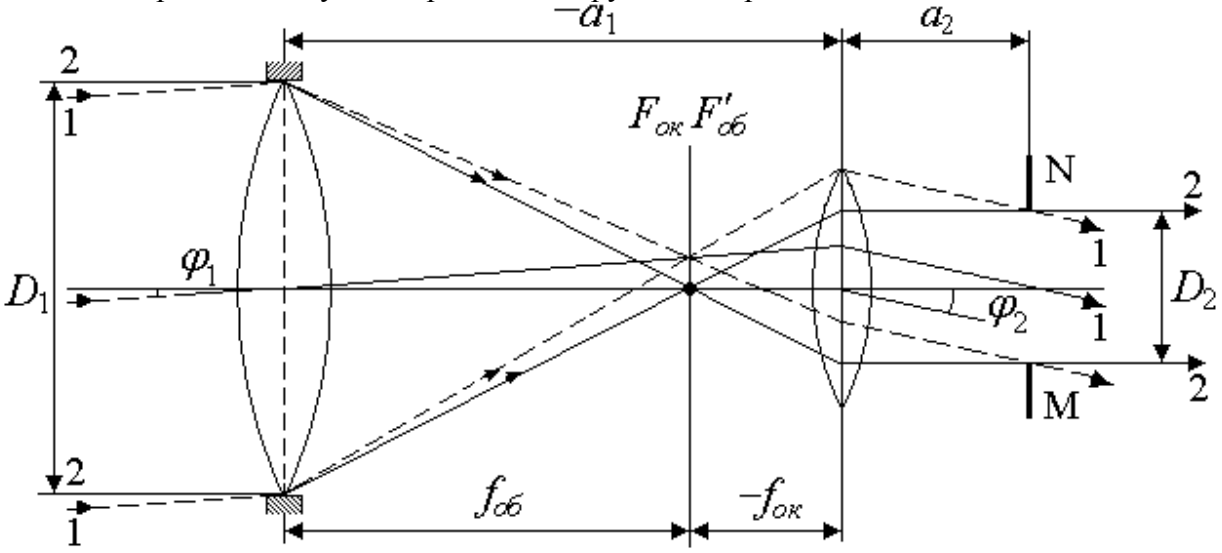


Рис. 19.3

Объективом и окуляром этой трубы служат собирающие линзы, расположенные на таком расстоянии, чтобы задний $F'_{об}$ длиннофокусного объектива и передний $F_{ок}$ короткофокусного окуляра совпадали. Эта труба дает обратное изображение.

Лучи 1 идут от одной точки удаленного предмета (т.к. точка расположена очень далеко, то лучи будут параллельными). Лучи 2 идут от другой точки предмета. В плоскости заднего фокуса объектива и переднего фокуса окуляра получается действительное изображение предмета. Это изображение рассматривается через окуляр

как через лупу. Из рис. 19.3 видно, что в плоскости MN получается изображение D_2 оправы объектива D_1. Увеличение трубы

$$\gamma = \frac{\mathrm{tg}\varphi_2}{\mathrm{tg}\varphi_1} = \frac{f_{об}}{f_{ок}} = \frac{D_1}{D_2}. \qquad (19.4)$$

Измерив соответствующие пары величин, входящих в выражение (19.4) можно рассчитать увеличение зрительной трубы.

В трубе Галилея (рис. 19.4) в качестве окуляра используется рассеивающая линза. Передний фокус окуляра по-прежнему совпадает с заданным фокусом объектива, но так как переднее фокусное расстояние рассеивающей линзы положительно, длина трубы Галилея меньше чем у трубы Кеплера.

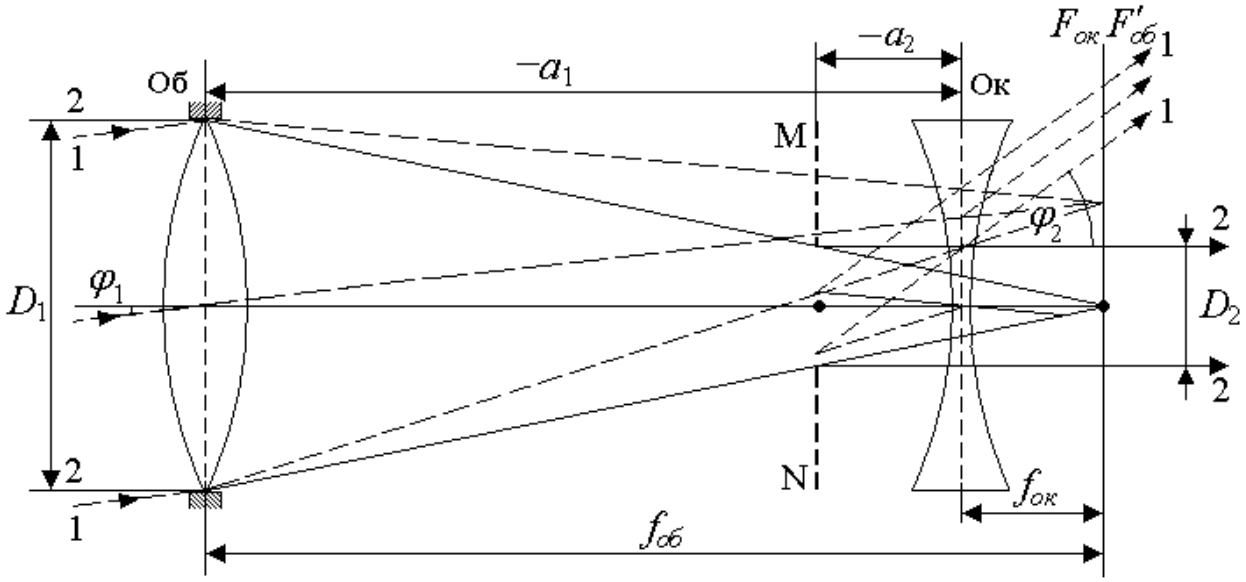


Рис. 19.4

Труба Галилея применяется в театральных биноклях. Разрешающая способность зрительной трубы определяется дифракцией на её апертурной диафрагме. Минимальное угловое расстояние ψ между двумя точечными предметами, равных интенсивностей, которые, в соответствие с критерием Рэлея, считаются разрешенными, определяется формулой

$$\psi = 1{,}22\frac{\lambda}{D_1} = 0{,}61\frac{\lambda}{R}. \qquad (19.5)$$

При расчетах ψ обычно полагают, что λ = 555 нм. Величина, обратная ψ, носит название разрешающей силы (способности)

$$A = \frac{1}{\psi} = \frac{R}{0{,}61\lambda}. \qquad (19.6)$$

Бинокли. Оптические приборы, составление из двух параллельных зрительных труб, позволяют наблюдать удаленный предмет двумя глазами.

Такие приборы называют биноклями. В биноклях с целью уменьшения длины тубуса и увеличения расстояния между объективами (из-за чего улучшается стереоскопичность зрения) применяют призмы полного отражения. Схема одной из труб призменного бинокля дана на рис. 19.5.

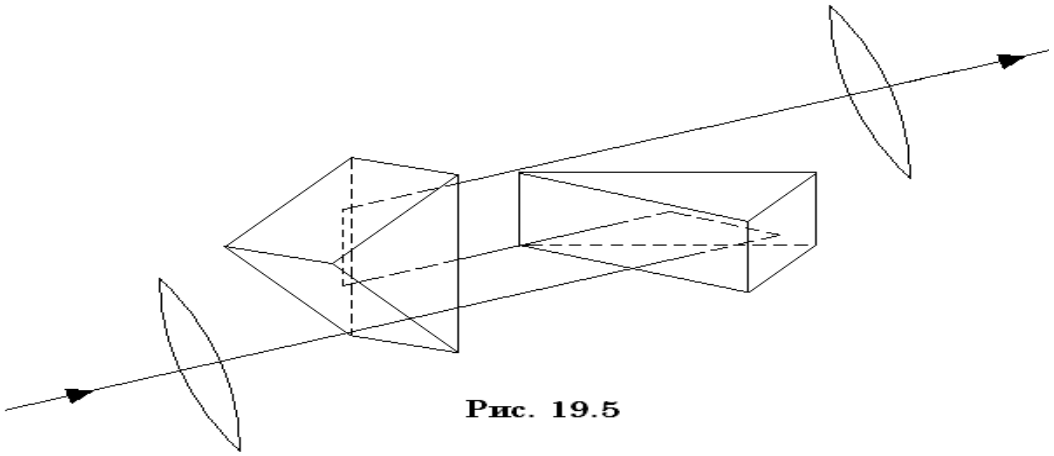


Рис. 19.5

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение увеличения лупы.

1. Определить фокусное расстояние лупы.
2. По формуле (19.3) рассчитать увеличение лупы.
3. Построить ход лучей в лупе для разных случаев расположения предмета.

Задание 2. Определение увеличения и разрешающей способности (силы) зрительной трубы.

1. Сфокусировать зрительную трубу на линейку с делениями, расположенную на расстоянии не менее 8 − 10 метров.
2. Наблюдая линейку одновременно одним глазом через трубу, вторым − без прибора, подсчитать число делений n_2 − видимых через трубу и число делений n_1 − видимых невооруженным глазом и совпадающих с деланиями n_2.
3. Рассчитать увеличение по формуле

$$\gamma = \frac{n_1}{n_2}. \qquad (19.7)$$

4. Пользуясь формулой (19.6), рассчитать разрешающую силу зрительной трубы.
5. Построить ход лучей в зрительных трубах Кеплера и Галилея.

Задание 3. Определение увеличения бинокля.

1. Выполнить п.п. 1 − 3 задания II для бинокля,
2. Построить ход лучей в бинокле.

Контрольные вопросы

1. Что называется угловым увеличением оптической системы?
2. Что такое разрешающая способность?
3. Чем труба Галилея отличается от трубы Кеплера?
4. С какой целью в биноклях устанавливают призмы полного отражения?

Лабораторная работа №20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛАСТИНОК С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

Цель работы - углубленно изучить закон преломления света, ознакомиться с простейшим методом определения показателя преломления света.

Необходимое оборудование - микроскоп, осветитель, микрометр, исследуемые плоско-параллельные прозрачные пластинки, светофильтры.

Краткие теоретические сведения

Преломление световых лучей подчиняется следующему закону: луч, падающий на границу раздела сред, нормаль к поверхности раздела в точке падения и луч преломленный лежат в одной плоскости, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная относительному показателю преломления

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}. \tag{20.1}$$

Относительный показатель преломления второй среды относительно первой показывает во сколько раз скорость распространения света в первой среде (υ_1) больше, чем во второй (υ_2)

$$n_{21} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}. \tag{20.2}$$

Абсолютным показателем преломления данной среды называется физическая величина, показывающая но сколько раз скорость света в вакууме (c) больше скорости распространения света в этой среде

$$n_1 = \frac{c}{\upsilon_1}; \quad n_2 = \frac{c}{\upsilon_2}. \tag{20.3}$$

Показатель преломления зависит от физических свойств сред и длины волны света. Для прозрачных сред зависимость показателя преломления от длины волны описывается следующей эмпирической формулой

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \ldots, \tag{20.4}$$

где A, B, C − константы, характерные для данного вещества; λ − длина волны света.

Разработаны много методов определения показателя преломления:

1. Метод определения показателя преломления при помощи микроскопа. Он применяется, главным образом, для определения показателя преломления твердых прозрачных тел в форме плоскопараллельных пластинок.
2. Метод определения показателя преломления при помощи спектрометра, гониометра, применяется для определения показателей преломления твердых тел и жидкостей в форме трехгранных призм.
3. Метод, основанный на явлении полного отражения света, называемый методом рефрактометра, применяется для определения показателей преломлении твердых тел и жидкостей.
4. Метод определения показателя преломления при помощи интерферометров и интерференционных рефрактометров. Этот метод дает возможность определять показатели преломления с точностью до шестого знака. Его можно применять для твердых тел, жидкостей и газов.

Описание установки и теория метода

В данной работе для определения показателя преломления используется первый из перечисленных методов. Он реализуется да базе микроскопа с револьверной головкой, имеющего микрометрический винт, набор сменных объективов и окуляров.

Если рассматривать предмет через плоскопараллельный слой вещества, имеющего большую оптическую плотность, чем воздух, то вследствие преломления световых лучей на обеих поверхностях, рассматриваемый предмет будет казаться приподнятым на величину, зависящую от толщины слоя и его показателя преломления. Это явление и положено в основу определения показателя преломления.

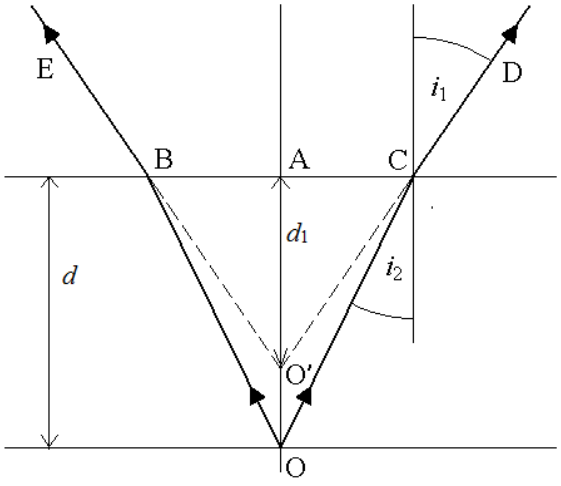


Рис. 20.1

Рассмотрим ход лучей через плоскопараллельную стеклянную пластинку (рис. 20.1).

Проведем из точки 0, нанесенной на нижнюю поверхность пластинки, два световых луча ОВ и ОС, После преломления эти лучи, выходя из пластинки в точках В и С, пройдут по направлениям СД и ВЕ, т.е. отклонятся от перпендикуляра на угол i_1. Наблюдая сверху, мы уводим точку О на пересечении продолжения лучей СД и ВЕ, т.е. в точке О'. Таким образом, точка покажется нам приподнятой, расположенной ближе на величину ОО'.

Обозначим истинную толщину пластинки d, а кажущуюся – d_1. Абсолютный показатель преломления слоя прозрачного вещества можно вычислить, измерив d, и d_1. Из треугольника АОС АС = АО·tgi_2, из треугольника АО'С АС = АО'·tgi_1. Поэтому

$$\frac{\mathrm{AO}}{\mathrm{AO'}} = \frac{\mathrm{tg}\, i_1}{\mathrm{tg}\, i_2}. \qquad (20.5)$$

Замена тангенсов соответствующих углов на их синусы возможна вследствие малости углов i_1 и i_2.

Из соотношений (20.1) и (20.5), учитывая, что АО = d, а АО′ = d_1 и i_1 и i_2 – малые углы, получим

$$n_{21} = \frac{d}{d_1}. \qquad (20.6)$$

Порядок выполнения работы

1. С помощью осветителя и зеркала микроскопа добиться оптимальной яркости поля зрения в окуляре.
2. Микрометром измерить истинную толщину пластинка d.
3. Нанести на нижнюю и верхнюю поверхности пластинки взаимно перпендикулярные метки и положить эту пластинку, на предметный столик так, чтобы метки оказались под объективом микроскопа.
4. С помощью винта грубой .фокусировки поднять тубус микроскопа в крайнее верхнее положение. Ориентируясь по меткам на направляющих микроскопа, установить механизм микрометрической фокусировки в нижнее нулевое положение.
5. С помощью винта грубой фокусировки опустить тубус микроскопа до получения резкого изображения метки на нижней поверхности пластинки.
6. Поднимая тубус микроскопа с помощью микрометрического винта, считая при этом число полных оборотов, перефокусировать микроскоп на метку на верхней поверхности пластинки. Зная число полных оборотов, число делений барабана микрометрического винта и цену деления шкалы барабана, определить высоту поднятия тубуса микроскопа, а следовательно, и кажущуюся толщину пластинки d.
7. По полученным данным (d, d_1) рассчитать по (20.6) показатель, преломления

материала, из которого изготовлена пластинка.

8. Определить показатели преломления всех предложенных плоскопараллельных пластинок в белом и монохроматическом .свете.

9. Оценить погрешность и указать её источники и причины.

Контрольные вопросы

I. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателя преломления? Как они связаны между собой?

2. Записать и объяснить закон Снеллиуса.

Лабораторная работа №21

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА

Цель работы: изучить устройство и принцип действия рефрактометра, научиться пользоваться этим прибором.

Оборудование: рефрактометр Аббе, набор кювет с исследуемыми растворами сахара и поваренной соли различных концентраций, дистиллированная вода.

Краткие теоретические сведения

Для определения показателя преломления существует много методов. Один из них основан на использовании явления полного отражения света и реализуется в приборах, получивших название рефрактометров.

При переходе светового луча через границу двух сред из среда оптически более плотной в среду оптически менее плотную угол преломления всегда больше угла падения. При некотором значении угла падения, который называется предельным, угол преломления равен 90°. Преломленный луч при этом скользит вдоль границы раздела сред. Закон преломления для этого случая запишется в виде

$$n = n_1 \sin r, \qquad (21.1)$$

где r − предельный угол для границы раздела данных двух сред; n − показатель преломления оптически менее плотной среды; n_1 − показатель преломления оптически более плотной среды.

При углах падения больших предельного преломленного луча как такового нет и практически весь световой поток (99,9 %) отражается от границы раздела сред под углом, равным углу падения. Это явление получило название полного отражения.

Как известно, ход световых лучей подчиняется принципу обратимости, В соответствии с этим принципом луч, направленный вдоль границы раздела двух сред, будет преломляться в оптически более плотную среду под предельным углом r.

Устройство и принцип действия рефрактометра

В настоящей работе используется рефрактометр Аббе. В рефрактометрах этого типа исследуемая жидкость помещается в зазоре толщиной около 0,1 мм между гранями двух стеклянных прямоугольных призм (рис. 21.1). В измерениях могут быть попользованы два метода: метод скользящего луча и метод полного отражения.

Эти методы применяются в том случае, если исследуемая жидкость является оптически менее плотной по сравнению со стеклом, из которого изготовлена призма P_2. Для измерения показателя преломления непрозрачных жидкостей применяется метод

полного отражения. В этом случае освещение ведется через грань DF призмы P_2, а при методе скользящего луча свет направляется через грань AB призмы P_1 и достигает грани AC, которая является матовой, а, следовательно, рассеивает свет равномерно по всем возможным направлениям. Рассеянный свет проходит через слой жидкости и проникает далее в призму P_2 через ее полированную грань DE. Дня лучей, которые скользят вдоль грани, закон преломления записывается в виде формулы (21.1).

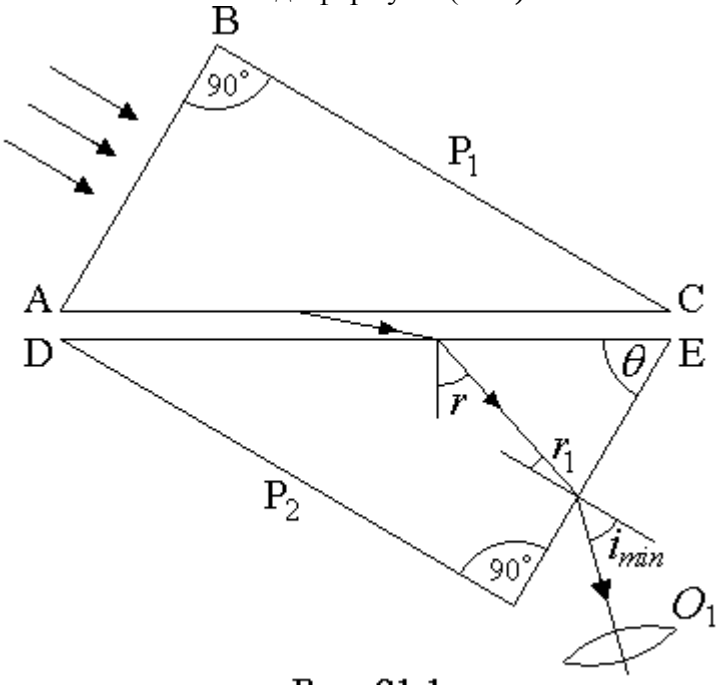


Рис. 21.1

Для грани EP закон преломления запишется в виде:

$$n_1 \sin r_1 = \sin i_{\min}. \qquad (21.2)$$

Преломляющий угол θ призмы P_2

$$\theta = r + r_1. \qquad (21.3)$$

Из соотношений (21.1) − (21.3) находим,

$$n = \sin\theta\sqrt{n_1^2 - \sin^2 i_{\min}} - \cos\theta \sin i_{\min}. \qquad (21.4)$$

Угол выхода лучей i_{min} будет иметь наименьшее значение для скользящих лучей. Лучи, падающие на грань DE под .углом от 0° до 90°, будут выходить через грань EF под углами от 90° до i_{min}.

Если на пути этих лучей поставить собирающую линзу O_1, то в её фокальной плоскости получается изображение, на котором будет видна резкая граница между светом и тенью. Граница раздела соответствует направлению выхода лучей под наименьшим углом i_{min}, её положение зависит от величины показателя преломления исследуемой жидкости.

Граница рассматривается через вторую линзу, которая совместно с O_1 образует зрительную трубу, установленную на бесконечность. С помощью такой трубы определяется угол i_{min} и по известным значениям θ и n_1 рассчитывают показатель преломления.

При освещении призм белым светом вследствие явления дисперсии граница раздела будет размыта и окрашена в различные цвета. Чтобы получить резкое изображение, перед объективом зрительной трубы помещаются две призмы прямого зрения (призмы Амичи). Каждая призма состоит из трех склеенных призм с различными показателями преломления и различной дисперсией (крайние призмы изготовлены из кронгласа, а средняя из флинтгласа). Призмы рассчитаны так, чтобы монохроматический

луч с длиной волны 589,3 нм (желтая линия натрия) не испытывал отклонения. Такое устройство называется компенсатором.

При положении призм компенсатора, указанном на рис. 21.2, их дисперсия равна нулю; при повороте одной из призм на 180° вокруг оптической оси системы дисперсия будет равна сумме дисперсий двух призм. В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсию можно изменять от нуля до максимального значения.

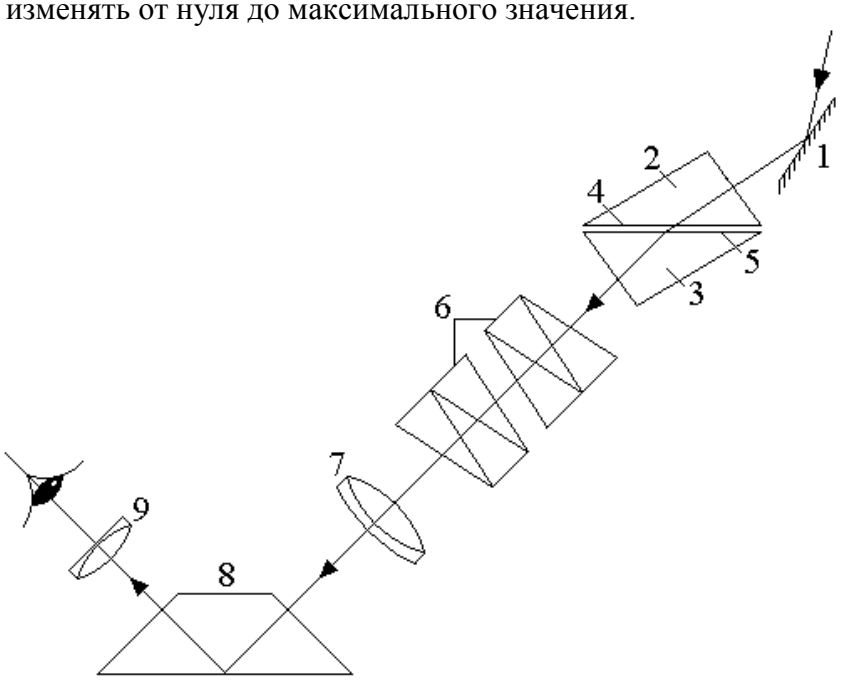


Рис 21.2

Поворотом призм компенсатора с помощью специального устройства добиваются резкого изображения границы, положение которой соответствует значению показателя преломления для желтой линии натрия (589,3 нм).

Схематически ход лучей в рефрактометре Аббе представлен на рис. 21.2, где указано 1 − осветительное зеркало; 2 − откидная, призма; 3 − основная призма; 4 − матовая грань; 5 − исследуемая жидкость; 6 − призмы компенсатора; 7 − объектив трубы; 8 − оборотная призма; 9 − окуляр с отсчётной шкалой, расположенной в фокальной плоскости окуляра.

Перед началом работы проверяют правильность калибровки шкалы прибора. Для этой цели между призмами 2 и 3 помещают каплю дистиллированной воды. Смещая окуляр в тубусе трубы, добиваются четкого изображения шкалы и визирной линии. Поворотом компенсатора убирают радужную окраску и добиваются четкого изображения границы. Далее зрительную трубу перемещаю до совпадения визирной линии с границей раздела. При правильной калибровке шкалы показание прибора должно быть равно 1,333 (при 20 °С).

Порядок выполнения работы

1. Открыть откидаю призму 2 рефрактометра и при помощи пипетки поместить 1 − 2 капли дистиллированной воды на основную призму 3.
2. Закрыть откидную призму и, используя указания по работе с прибором, проверить его калибровку. При правильной калибровке показание рефрактометра должно быть и 1,333.
3. Последовательно помещая в зазор между откидной и основной призмами растворы сахара разных концентраций, измерить показатели преломления. Результаты

занести в таблицу. После каждого измерения призмы промыть дистиллированной водой и протереть мягкой фланелью.

4. По данным таблицы построить график зависимости показателя преломления от концентрации раствора сахара $n = n(C\ \%)$.

5. Измерить показатель преломления раствора сахара неизвестной концентрации и при помощи графика $n = n(C\ \%)$ определить концентрации этого раствора.

6. Аналогичные п.п. 3 − 5 действия проделать для исследуемых растворов поваренной соли.

7. Тщательно промыть и просушить рефрактометр.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление полного отражения?
2. В чем состоит физический смысл показателя преломления?

Лабораторная работа №22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Цель работы - научиться определять длину световой волны с помощью дифракционной решетки.

Необходимое оборудование - штатив с муфтой и лапкой; прибор для определения длины световой волны; дифракционная решетка; лампа накаливания.

Теоретические сведения

Одним из самых простых методов определения длины световой волны является метод, связанный с наблюдением дифракции света от дифракционной решетки.

Дифракционная решетка с известным периодом d, указанным на решетке, устанавливается в держателе, который прикреплен к концу линейки (рис. 22.1). К линейку прикреплен черный экран с узкой вертикальной щелью посередине. Этот экран можно перемещать вдоль линейки. На экране и линейке прикреплены миллиметровые шкалы.

Если смотреть сквозь решетку и щель экрана на источник света, то на черном экране можно увидеть дифракционные цветные спектры по разные стороны от щели.

Длина волны λ определяется по формуле $\lambda = \frac{d \sin\varphi}{\mathbf{k}}$, где k - порядок спектра, φ - угол, под которым наблюдается максимум света определенной длины волны.

Обозначим a - расстояние от решетки до экрана, b - расстояние от решетки до линии спектра, а φ - угол наблюдения не более 5 °, тогда $\lambda = \frac{db}{ka}$, поскольку для малых углов sin φ можно заменить tg φ.

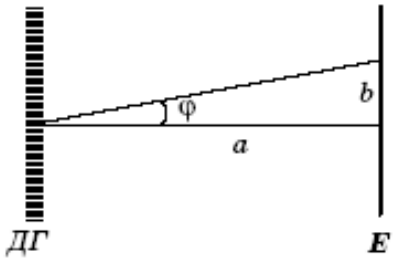


Рис. 22.1

Порядок выполнения работы

1. Установить в рамку дифракционную решетку.

2. Отодвинуть экран со щелью на максимальное расстояние от дифракционной решетки. Направить ось прибора таким образом, чтобы через щель экрана наблюдалась нить накаливания лампы.

3. Наблюдать по обе стороны от щели дифракционные цветные спектры.

4. С помощью шкалы на экране определить положение середин цветных полос в спектрах первого порядка.

5. Результаты занести в таблицу.

6. По данным из таблицы определить длину волны и сравнить с табличными данными.

7. Сделать выводы.

Таблица 22.1

Цвет полоски	b, м (слева)	b, м (справа)	b, м (среднее)	*a*, м	d,м	λ, м	λ света, м
Фиолетовый							
Синий							
Голубой							
Зеленый							
Желтый							
Оранжевый							
Красный							

Контрольные вопросы

1. Как будет меняться дифракционная картина, если перед щелью последовательно размещать светофильтры?

2. Как изменится дифракционная картина, если дифракционную решетку заменить на другую, с периодом d = 1/20 мм, d = 1/500 мм?

3. Определить длину желтой и фиолетовой волн, наблюдая за спектрами второго порядка. Эти величины сравнить с результатами, полученными в ходе проведения лабораторной работы.

Лабораторна робота № 23

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ РАСТВОРАМИ

Цель работы - ознакомление с оптическим методом определения концентрации растворов оптически активных веществ по измерению поворота плоскости поляризации.

Необходимое оборудование - полутеневой поляриметр с осветителем, трубка, исследуемые растворы.

Краткие теоретические сведения

Световые волны поперечны (рис. 23.1).

Электрический вектор $\vec{E}$ и магнитный вектор $\vec{B}$ ($\vec{B} \perp \vec{E}$) располагаются в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны (лучу *S*). Во всякой точке пространства ориентация пары векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в плоскости, перпендикулярной к лучу

S, может изменяться со временем. В зависимости от характера такого изменения различают естественный и поляризованный свет.

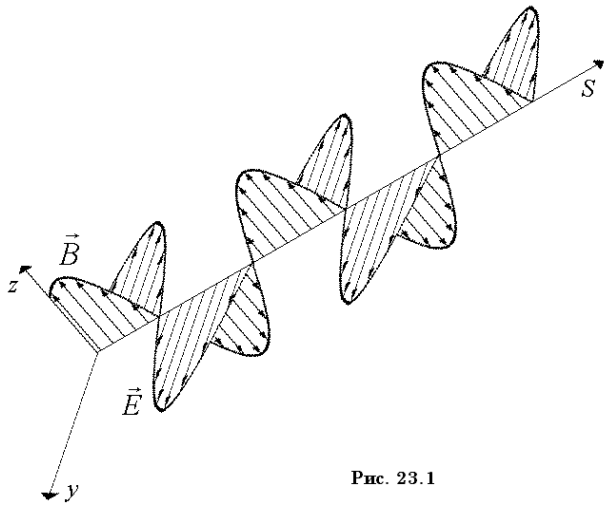


Рис. 23.1

Обычный источник света является совокупностью огромного числа быстро высвечивающихся ($10^{-7} \div 10^{-8}$ с) элементарных источников (атомов или молекул), испускающих свет независимо друг от друга с разными фазами и с разными ориентациями векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Ориентация векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в результирующей волне хаотически изменяется во времени, так, что в плоскости, перпендикулярной к лучу *S*, все направления оказываются равноправными. Такой свет называется естественным или неполяризованным.

При помощи специальных приспособлений (поляризаторов), естественный свет может быть превращен в линейно поляризованный. В линейно поляризованной волне пара векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ не изменяют с течением времени своей ориентации (рис. 23.1). Плоскость *ES* называется в этом случае плоскостью колебаний. В некоторых случаях может быть получен эллиптически поляризованный свет. В эллиптически. поляризованной световой волне конец вектора $\vec{E}$ (в данной точке пространства) описывает некоторый эллипс. Линейно-поляризованный свет можно рассматривать как частный случай эллиптически поляризованного света, когда эллипс поляризации вырождается в отрезок прямой линии; другим частным случаем является круговая поляризация.

Отличать естественный свет от поляризованного и определять направления световых колебаний в нем можно при помощи анализаторов; те же приборы служат и для получения поляризованного света.

Принцип действия различных поляризующих приборов одинаков. Направления колебаний электрического и магнитного векторов естественного света всегда "сортируются" этими приборами так, что в один пучок отбирается преимущественно (или сполна) излучение с одним направлением электрических колебаний, а другой − излучение с перпендикулярным направлением электрических колебаний. Смешение обоих пучков снова даст естественный свет.

Иногда явление несколько сглаживается тем обстоятельством, что один из этих пучков претерпевает более или менее полное поглощение (турмалин, непрозрачный диэлектрик). Два взаимно перпендикулярных направления колебаний в двух пучках, образующихся при поляризации, определяются физическими особенностями примененного поляризатора (в случае турмалина и др. кристаллов они определены строением кристалла, в случае зеркала − направлением плоскости падения и т.д.). Эти избранные направления можно назвать главными плоскостями P_1 и P_2 ($P_1 \perp P_2$). Если естественный свет проходит через два поляризующих прибора, соответствующие плоскости которых образуют между собой угол γ, то интенсивность света, пропущенного такой системой, будет пропорциональна $\cos^2\gamma$. Закон этот был сформулирован Малюсом в 1810 году и подтвержден тщательными фотометрическими измерениями Араго, который построил на этом принципе фотометр.

Небезынтересно заметить, что Малюс вывел закон, основываясь на корпускулярных представлениях о свете. С волновой точки зрения закон Малюса

представляет собой следствие теоремы разложения вектора амплитуды и утверждение, что интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды световой волны. Действительно, если угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен γ, то проекция вектора $\vec{E}_0$ линейно поляризованного света, вышедшего из поляризатора, на главную плоскость анализатора, равна:

$$E_{\parallel} = E_0 \cos\gamma. \tag{23.1}$$

Учтя, что интенсивность света I пропорциональна квадрату амплитуды световой волны (в данном случае $E_{\parallel}$), получим

$$I = I_0 \cos^2 \gamma. \tag{23.2}$$

Это и есть закон Малюса. Он лежит в основе расчета интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор, во всевозможных поляризационных приборах.

Поляризованный свет, распространяясь в некоторых кристаллах (кварц, киноварь и др.) вдоль их оптических осей, испытывает вращение плоскости поляризаций. Это явление наблюдается и в некоторых чистых жидкостях (скипидар), а также в растворах многих веществ (водный раствор сахара, раствор виннокаменной кислоты и др.). Вещества, вращающие плоскость поляризации света, называются оптически активными.

Если смотреть навстречу лучу, то плоскость поляризации оптически активным веществом может быть повернута либо по ходу часовой стрелки, либо против хода часовой стрелки. Вещества, вращающие плоскость поляризации по часовой стрелке, называются правовращающими, а вращающие против часовой стрелки − левовращающими.

Вращение плоскости поляризации можно объяснить, если представить плоскополяризованный пучок света как результат сложения двух пучков, поляризованных по кругу с правым и левым направлением вращения, распространяющихся в оптически активной среде с разными скоростями. Угол поворота плоскости поляризации в твердом теле можно рассчитать по формуле:

$$\varphi = \pi \frac{(n_{пр} - n_{л})d}{\lambda_0} = [\alpha]d, \tag{23.1}$$

где $n_{пр}$, $n_{л}$ − показатели преломления лучей, право- и левополяризованных по кругу, λ_0 − длина волны света в вакууме, d − толщина пронизываемого светом слоя оптически активного вещества, $[\alpha]$ − коэффициент, называемый удельным вращением и зависящий от температуры тела и длины световой волны.

В случае растворов угол φ вращения плоскости поляризации пропорционален не только толщине d но и концентрации C раствора, т.е.

$$\varphi = [\alpha]Cd. \tag{23.2}$$

Удельное вращение для растворов относят к концентрации 1 г/см^3 и толщине 1 дм.

Для раствора сахара при t = 20 °С для желтых лучей (λ = 5893 Å) $[\alpha]$ = 66,46 град·см^3/дм·г.

Из уравнения (23.2) можно найти концентрацию раствора

$$C = \frac{\varphi}{[\alpha]d}. \tag{23.3}$$

Описание прибора и теория метода

Для измерения угла поворота плоскости поляризации растворами используются поляриметры.

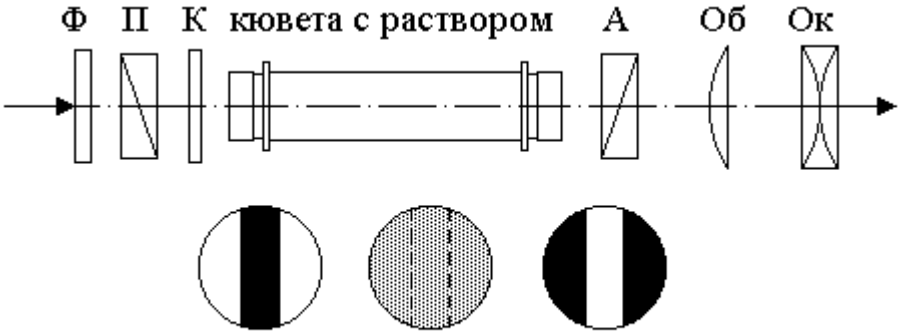


Рис. 23.2

Одним из наиболее точных является полутеневой поляриметр (рис. 23.2), в котором установка производится не на полную темноту, а на равное затемнение двух или более частей поля зрения. Добиваются этого таким образом. Световой пучок, исходящий от матовой лампы накаливания, пройдет желтый светофильтр (Ф), конденсор и поляризатор (П) с плоскостью пропускания P_{Po}, своей средней частью проходит через кварцевую пластину(К) и анализатор (А), а двумя крайними частями − только через анализатор.

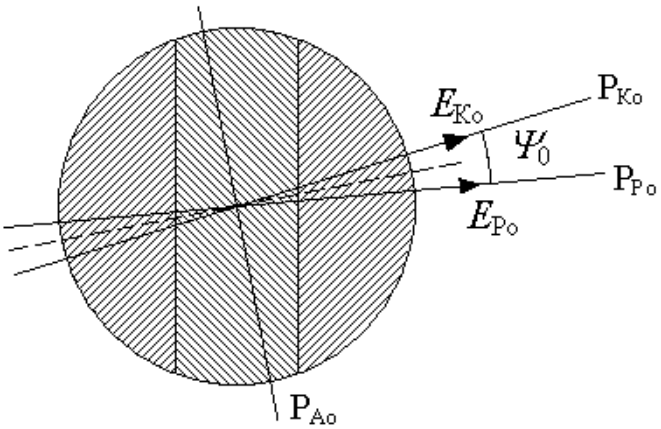


Рис. 23.3

Кварцевая пластина (средняя часть рис. 23.3) вызывает поворот плоскости поляризации на небольшой угол Ψ_0 (от плоскости P_{Po} до плоскости P_{Ko}). Поэтому интенсивность лучей, прошедших через анализатор, будет в общем случае, различна для средней и крайних частей поля зрения.

Интенсивности света (и, следовательно, яркости соответствующих, частей поля зрения) пропорциональны квадратам проекций амплитуд напряженности электрического поля на плоскость пропускания анализатора P_{Ao} (рис. 23.3). E_{Po} − амплитуда вектора напряженности электрического поля волны, прошедшей только через поляризатор (мимо кварцевой пластинки − крайние части поля зрения), E_{Ko} − амплитуда волны, прошедшей и через кварц (средняя часть поля зрения).

Значит, возможны лишь два положения анализатора, при которых проекции амплитуд вектора $\vec{E}$ и интенсивности частей поля зрения одинаковы: 1) когда след плоскости пропускания анализатора совпадает с биссектрисой угла (части поля зрения одинаково ярко освещены); 2) когда след этой плоскости P_{Ao} перпендикулярен биссектрисе угла Ψ_0 (части поля зрения одинаково затемнены). Второе положение может быть зафиксировано точнее (чувствительность глаза выше при меньшей освещенности), поэтому поляриметр обычно настраивают на затемнение, что соответствует почти полному скрещиванию поляризатора и анализатора (86 − 87°), так как угол, на который

поворачивается плоскость колебаний в кварце, $\Psi_0 \approx 5 - 7°$. Это положение анализатора P_{Ao} называется нулевой точкой.

Трубка с исследуемым раствором помещается между поляризатором (с кварцевой пластинкой) и анализатором (рис. 23.2). Если исследуемое вещество является оптически активным, то оно поворачивает плоскости поляризации всех лучей (идущих и через кварц и вне его) на определенный угол φ. Интенсивности частей поля зрения становятся различными. Но можно снова установить анализатор на равное затемнение поля зрения. Для этого придется установить след его плоскости пропускания перпендикулярно биссектрисе нового угла φ между плоскостями поляризации света, прошедшего через кварц и мимо него ($P_{A\varphi}$, рис. 23.4).

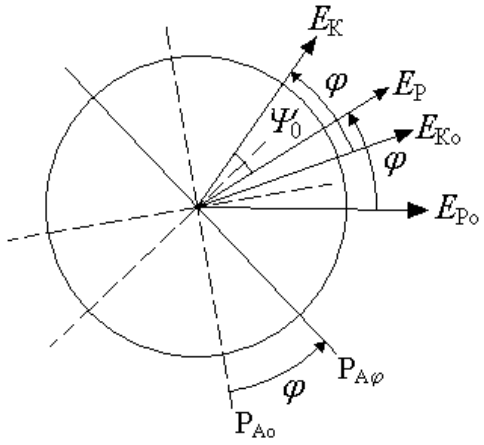


Рис. 23.4

Угол между нулевой точкой и новым положением анализатора (при одинаковом затемнении поля зрения) равен углу, на который поворачивает плоскость поляризации исследуемое вещество; он измеряется по шкале анализатора.

Круговой поляриметр, используемый в работе, состоит из следующих основных узлов: головки анализатора, поляризационного устройства, осветителя, штатива и трубки для растворов.

Порядок выполнения работы

1. Включить осветитель кругового поляриметра.
2. Перемещая муфту зрительной трубы, добиться резкого изображения тройного поля.
3. Вращая анализатор, добиться равномерного затемнения тройного поля и записать показания по шкале лимба и нониуса. Это будет нулевой точкой.
4. Поместить в поляриметр трубку с раствором сахара, добиться равномерного затемнения тройного поля, записать показания.
5. Найти угол поворота плоскости поляризации раствором сахара.
6. Пользуясь формулой (23.3), вычислить концентрацию раствора сахара.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются оптически активными?
2. Как объяснить вращение плоскости поляризации?
3. Каков смысл удельного вращения?
4. Почему в поляриметрах используется полутеневой метод?
5. Сформулировать закон Малюса.
6. Объяснить действие углового нониуса.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Барановський В.М.,** Черенков А.В. Загальна фізика: Курс лекцій: В 3 ч. / За заг. ред. В.М.Барановського.− К.: Вид-во Європ. ун-ту, 2004.
2. **Барановський В.М.**, Бережний, П.В., Горбачук І.Т. та ін. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. посібник / За заг. ред. І.Т. Горбачука.− Київ: Вища школа, 1992.
3. **ГОСТ 16.263-70.** Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
4. **Гольдин Л.Л.**, Игошин Ф.Ф., Козел С.М. и др. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / Под. ред. Л.Л.Гольдина.− М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.
5. **Деденко Л.Г.** Математическая обработка и оформление результатов эксперимента / Л.Г. Деденко, В.В. Керженцев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.
6. **Дущенко В.П.**, Барановський В.М., Бережний П.В. та ін. Физический практикум: В 2-х ч. / За заг. ред. Дущенко В.П.− К.: Вища школа, 1984
7. **Евграфова Н.Н.**, Каган В.Л. Руководство к лабораторным работам по физике.− Мю: Высш. шк., 1970.− 283 с.
8. **Иверонова В.А.** Физический практикум: Механика й молекулярная физика. – М., 1967.
9. **Иверонова В.А.** Физический практикум: Электричество и оптика.− М.: Наука, 1968.
10. **Кабардин О.Ф.** Физика: Справочные материалы. Учеб. пособие для учащихся. - Изд. 3-е, перераб. - М.: Просвещение, 1991.
11. **Кучерук І.М.**, Дущенко В.П., Андріанов В.М. Обробка результатів фізичних вимірювань.− Київ: Вища школа, 1981.
12. **Марголис А.А.** и др. Практикум по школьному физическому эксперименту : учеб. пособие для пединститутов. - М.: Просвещение, 1968.
13. **Рублёв Ю.В.**, Куценко А.Н., Кортнев А.В. Практикум по электричеству с элементами программированного обучения.− М.: Высш. шк., 1971.
14. **Савельев И.Е.** Курс общей физики. − Т 1: Механика. Молекулярная физика. – М., 1982.
15. **Савельев И.Е.** Курс общей физики.− Т 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.− М.: Наука, 1988.
16. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики.− Т 1: Механика. – М.: Наука, 1989.
17. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики.− Т 2: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
18. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики.− Т 3: Электричество.– М.: Наука, 1977.

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Барановський В.М., Бережний, П.В., Горбачук І.Т. та ін. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. посібник / За заг. ред. І.Т. Горбачука.− Київ: Вища школа, 1992.

2. Гершензон Е.М., Малов Н.Н. Курс общей физики: Электродинамика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов.– М.: Просвещение, 1990.

3. Гольдин Л.Л., Игошин Ф.Ф., Козел С.М. и др. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / Под. ред. Л.Л.Гольдина.− М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.

4. Деденко Л.Г. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента / Л.Г. Деденко, В.В. Керженцев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.

5. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковский Л.Б. Курс физики.− Т 2: Электричество и магнетизм.− М.: Высш. шк., 1977.− 375 с.

6. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Вища школа, 1987.

7. Калашников С.Г. Электричество.– М.: Наука, 1977.

8. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм.– Київ: Вища школа, 1990.

9. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов.- М., 1982.

10. Савельев И.Е. Курс общей физики. − Т 1: Механика. Молекулярная физика. – М., 1982.

11. Савельев И.Е. Курс общей физики.− Т 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.− М.: Наука, 1988.

12. Сивухин Д.В. Общий курс физики.− Т 1: Механика. – М.: Наука, 1989.

13. Сивухин Д.В. Общий курс физики.− Т 2: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

14. Сивухин Д.В. Общий курс физики.− Т 3: Электричество.– М.: Наука, 1977.

15. Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество.– М.: Просвещение, 1969 .

АННОТАЦИЯ

В пособии представлены рекомендации и указания к выполнению лабораторного практикума по физике. Каждая работа содержит краткие теоретические сведения, детальное описание экспериментальных установок и последовательность выполнения, снабженное расчетными формулами и методами оценки правильности полученных результатов.

Предназначено для студентов специальностей естественного и технического циклов подготовки, студентов физических специальностей, а также будет полезно для преподавателей высших учебных заведений, колледжей, лицеев, гимназий, школьных учителей.

АНОТАЦІЯ

У посібнику представлені рекомендації та вказівки щодо виконання лабораторного практикуму з фізики. Кожна робота містить короткі теоретичні відомості, детальний опис експериментальних установок і послідовність виконання, забезпечений розрахунковими формулами і методами оцінки правильності отриманих результатів.

Призначений для студентів спеціальностей природничого та технічного циклів підготовки, студентів фізичних спеціальностей, а також буде корисним для викладачів вищих навчальних закладів, коледжів, ліцеїв, гімназій, шкільних вчителів.

ANNOTATION

The manual presents guidelines and instructions for laboratory practical physics. Each work contains a brief theoretical information, detailed experimental facilities and consistency of performance, provided the calculated formulas and methods of assessing the accuracy of the results.

It is intended for students of the specialties of natural and technical training cycles, students of physical specialties, and will also be useful for teachers of higher educational institutions, colleges, lyceums, gymnasiums, school teachers.

Учебно-методическое издание

БОНДАРЕНКО Лина Игоревна
ЧОРНОБАЙ Екатерина Григорьевна

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ. Для студентов инженерно-технических и естественных факультетов университетов

В пособии представлены рекомендации и указания к выполнению лабораторного практикума по физике. Каждая работа содержит краткие теоретические сведения, детальное описание экспериментальных установок и последовательность выполнения, снабженное расчетными формулами и методами оценки правильности полученных результатов.

Предназначено для студентов специальностей естественного и технического циклов подготовки, студентов физических специальностей, а также будет полезно для преподавателей высших учебных заведений, колледжей, лицеев, гимназий, школьных учителей.