

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

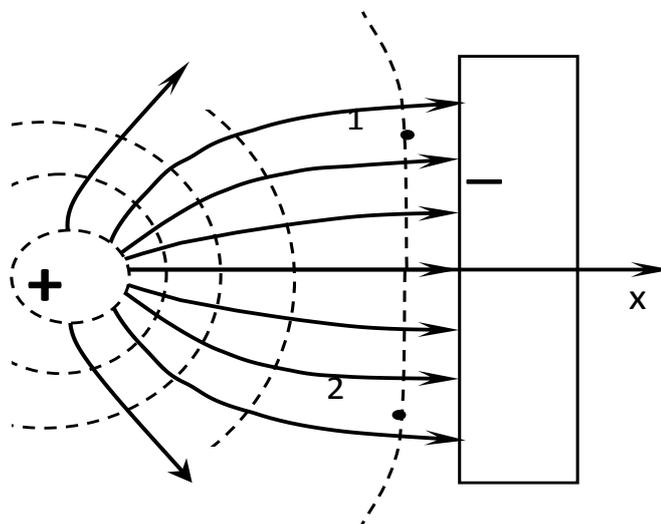
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики

ФИЗИКА

Методические указания

к выполнению лабораторных работ
по разделам «Механические колебания», «Молекулярная физика
и термодинамика», «Электродинамика» для студентов
строительных специальностей всех форм обучения



Воронеж 2021

УДК 53(07)
ББК 22.3я7

Составители:

канд. физ.-мат. наук Т. Л. Тураева, канд. физ.-мат. наук А. Г. Москаленко,
канд. физ.-мат. наук Е. П. Татьяна, канд. пед. наук Т. В. Дубовицкая,
канд. тех. наук Д. Ю. Золототрубов

ФИЗИКА: методические указания к выполнению лабораторных работ / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т. Л. Тураева, А. Г. Москаленко, Е. П. Татьяна, Т. В. Дубовицкая, Д. Ю. Золототрубов. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. - 35 с.

Содержат теоретический материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по разделам «Механика», «Молекулярная физика и термодинамика», «Электродинамика» дисциплины «Физика». Даны описание методик измерения, приборов и порядок выполнения лабораторных работ в учебных лабораториях кафедры физики ВГТУ.

Предназначены для студентов строительных специальностей всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР_МК_МКТиТЭ(часть2).pdf

Ил. 12. Табл. 14. Библиогр.: 4 назв.

УДК 53(07)
ББК 22.3я7

Рецензент - Е. В. Шведов, д-р. физ.-мат. наук, проф. кафедры физики ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

1. ОБЩИЙ ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторный практикум в курсе физики направлен на приобретение навыков проведения физического эксперимента, обработки результатов и оценки погрешности измерений.

Подготовка к выполнению лабораторной работы включает в себя: ознакомление с описанием работы, составление конспекта. В конспекте обязательно указываются: название работы, цель, оборудование, схема опыта, вывод расчетной формулы, таблицы для постоянных величин и результатов измерений и вычислений. Чтобы быть допущенным к выполнению измерений, студент должен знать содержание работы, порядок измерений, понимать суть законов и явлений, изучаемых в конкретной работе. После проведения эксперимента и необходимых расчетов, а в некоторых работах – построения графиков, полученные результаты анализируются, выполняется расчет погрешности измерений. В результате студенты получают экспериментальные подтверждения изучаемых физических законов. После оформления работы проводится ее защита в форме устной беседы с преподавателем по контрольным заданиям. Контрольные задания к каждой работе имеют несколько вариантов по 5-7 заданий, содержащих один теоретический вопрос и несколько качественных задач по теме лабораторной работы. Вариант указывается преподавателем.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МИНИМУМ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Л.р.	Тематический материал
№ 4.8	Упругие напряжения. Нормальное и тангенциальное напряжение. Закон Гука. Деформации растяжения и сжатия. Модуль упругости. Деформации сдвига. Модуль сдвига. Связь модуля сдвига с модулем Юнга. Коэффициент Пуассона. Деформация кручения. Связь модуля кручения с модулем сдвига. Энергия упруго деформированных тел.
№ 4.9	Идеальная жидкость. Описание движения жидкости с помощью метода Эйлера. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Вязкость жидкости. Закон Ньютона. Физический смысл величин, входящих в закон Ньютона. Кинематическая и динамическая вязкость. Метод Стокса, использующийся для определения коэффициента внутреннего трения. Ламинарное и турбулентное движение.
№ 4.10	Термодинамическая система и её параметры. Число степеней свободы молекул. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Внутренняя энергия и теплоёмкость идеального газа. Работа в термодинамике. Первое начало термодинамики и её применение к изопроцессам. Уравнение адиабаты.

№ 4.11	<p>Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции и его применение к расчету напряженности полей. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме. Применение теоремы Гаусса к расчету полей.</p> <p>Работа по перемещению заряда в электростатическом поле. Теорема о циркуляции вектора напряженности. Потенциал. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности. Графическое изображение электростатических полей. Связь между напряженностью и потенциалом.</p>
№ 4.12	<p>Электрический заряд. Закон сохранения заряда. Закон Кулона. Емкость уединенного проводника и конденсатора. Расчет емкости плоского, сферического и цилиндрического конденсаторов. Соединение конденсаторов. Энергия электрического поля точечных зарядов и конденсаторов. Объемная плотность энергии электрического поля.</p>
№ 4.13, № 4.14 № 4.15	<p>Сила и плотность тока. Связь между вектором плотности тока и скоростью упорядоченного движения зарядов. Законы Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Сторонние силы, ЭДС и напряжение. Обобщенный закон Ома. Правила Кирхгофа и их применение к расчету разветвлённых цепей.</p>

2.1. Лабораторная работа № 4.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГОГО МОДУЛЯ СДВИГА СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: исследовать упругую деформацию кручения цилиндрического тела и определить модуль сдвига образца.

Оборудование: крутильный маятник, электронный измеритель времени крутильных колебаний, набор металлических дисков с известными моментами инерции, стальная проволока, электромагнит, измерительная линейка.

2.1.1. Описание установки и методика измерения

Под действием приложенных сил твердое тело деформируется, т.е. изменяют свои размеры и форму. Выделяют два основных вида упругой деформации твердого тела: растяжения-сжатия и сдвига. Изгиб, кручение и более сложные деформации относятся либо к одному из двух основных неоднородных деформаций, либо к их наложению.

Деформации вызывают появление в твердом теле упругих сил, которые характеризуются нормальным и (или) тангенциальным напряжением. Нормальным напряжением называется отношение нормальной составляющей силы F_n , дей-

ствующей на единицу площади поперечного сечения образца, а тангенциальное напряжение – тангенциальной составляющей F_τ :

$$\sigma = \frac{F_n}{S}, \quad (1.1)$$

$$\tau = \frac{F_\tau}{S}. \quad (1.2)$$

Согласно определению единицей измерения напряжения в системе СИ является $[\sigma] = [\tau] = H/m^2 = Па$.

Мерой деформации растяжения-сжатия является относительное удлинение (сжатие)

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}. \quad (1.3)$$

Мерой деформации сдвига является угол сдвига γ , выраженный в радианах

$$\gamma \approx \operatorname{tg} \gamma = \frac{BB'}{AB}. \quad (1.4)$$

где BB' – абсолютный сдвиг, AB – расстояние между параллельными плоскостями слоя (рис. 1.1). Относительные деформации ε и γ – безразмерные величины, иногда их представляют в процентах.

Для малых (упругих) деформаций растяжения-сжатия и сдвига, как показывают опыты, существует линейная связь между напряжением и соответствующей относительной деформацией:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.5)$$

$$\tau = G\gamma. \quad (1.6)$$

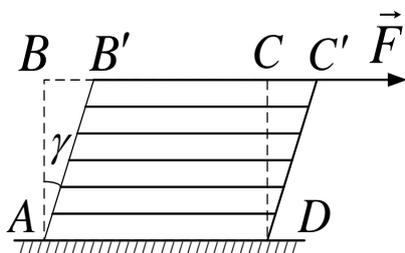


Рис. 1.1

Величины E и G называются модулями упругости, модуль E – модулем Юнга, а G – модулем сдвига. Размерность модулей упругости совпадает с размерностью напряжения, Па.

Кручением называется деформация образца, один конец которого закреплен, а на другой действует пара сил, плоскость которой перпендикулярна оси образца. Кручение состоит в относительном повороте параллельных друг другу сечений, проведенных перпендикулярно к оси образца. Деформация кручения является неоднородной. Она увеличивается при удалении от оси поворотов элементов образца.

Закон Гука для деформации кручения записывается в виде

$$M = f\varphi, \quad (1.7)$$

где f – постоянная для данного образца величина, называемая модулем кручения, φ – угол кручения, M – крутящий момент.

Модуль кручения показывает, какой момент сил нужно приложить, чтобы закрутить проволоку на угол в 1 рад . В отличие от модулей Юнга и сдвига эта величина зависит не только от материала, но и от геометрических размеров проволоки.

Деформацию кручения можно свести к деформации сдвига. Связь модуля кручения и модуля сдвига выражается формулой

$$f = \frac{\pi GR^4}{2L}, \quad (1.8)$$

где L – длина образца, R – радиус.

Экспериментально модуль кручения можно измерить. С этой целью подвесим на проволоке массивное симметричное тело и возбудим крутильные колебания. Эти колебания будут гармоническими с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{f}}, \quad (1.9)$$

где I – момент инерции тела, f – модуль кручения проволоки.

Если момент инерции тела I известен, то, определив период колебаний, можно вычислить модуль кручения проволоки по формуле (1.9).

На основании с регулируемым ножками расположен электронный измеритель времени крутильных колебаний и закреплена вертикальная колонка. На колонке установлены три кронштейна, причем нижний и средний, в случае необходимости, можно перемещать вдоль колонки. На среднем кронштейне имеется площадка в виде полукольца, на которой располагаются электромагнит и фотоэлектронный датчик. При необходимости их положение можно изменять.

Колеблющаяся система состоит из двух одинаковых упругих элементов (проволок) и инерционной рамки, позволяющей закреплять дополнительные инерционные грузы (диски) с известными моментами инерции относительно продольной оси (рис. 1.2).

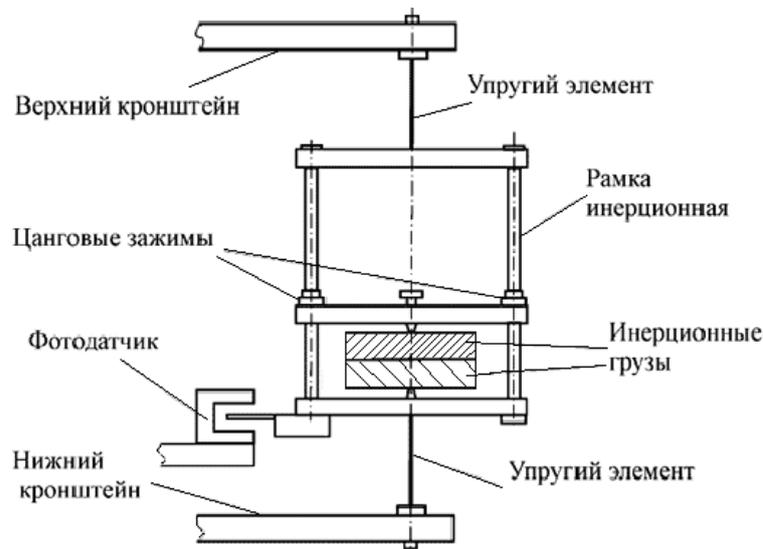


Рис. 1.2

Динамическое уравнение свободных колебаний крутильного маятника имеет вид:

$$I \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -M_{\text{упр}}, \quad (1.10)$$

где I – момент инерции колеблющейся системы, $\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ – угловое ускорение, $M_{\text{упр}}$ – момент упругих касательных сил.

С учетом (1.7) и (1.8) уравнение (1.10) представим в виде:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega^2 \varphi = 0, \quad (1.11)$$

где $\omega^2 = \frac{\pi GR^4}{2IL}$.

Решение уравнения (1.11) имеет вид:

$$\varphi = \varphi_m \cos(\omega t + \alpha), \quad (1.12)$$

здесь φ – угол поворота крутильного маятника к моменту времени t ; φ_m – заданная угловая амплитуда колебаний.

Период колебаний маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{2IL}{\pi GR^4}}. \quad (1.13)$$

Из (1.13) выразим модуля сдвига

$$G = \frac{8\pi IL}{T^2 R^4} = \frac{128\pi IL}{T^2 d^4}, \quad (1.14)$$

где d – диаметр проволочной подвески маятника.

Собственный момент инерции маятника неизвестен. Чтобы исключить этот параметр, необходимо иметь два дополнительных инерционных тела с известными моментами инерции, которыми нагружается маятник.

Пусть I_0 – неизвестный собственный момент инерции маятника, а I_1 и I_2 – моменты инерции дополнительных тел. В этом случае мы получим систему двух уравнений:

$$\begin{cases} GT_1^2 d^4 = 128\pi(I_0 + I_1) \cdot L, \\ GT_2^2 d^4 = 128\pi(I_0 + I_2) \cdot L. \end{cases} \quad (1.15)$$

Решая систему (1.15), получим:

$$G = \frac{128\pi L(I_1 - I_2)}{d^4 (T_1^2 - T_2^2)}, \quad (1.16)$$

здесь $L = \frac{\ell_1 \cdot \ell_2}{\ell_1 + \ell_2}$, где ℓ_1 и ℓ_2 – длины верхней и нижней проволочных подвесок маятника.

2.1.2. Порядок выполнения работы

1. Убедиться в том, что крутильный маятник в исходном состоянии имеет вертикальное положение.

2. Записать в таблицу 1.1 диаметр проволоки d .

3. Измерить ℓ_1 и ℓ_2 – длины верхней и нижней проволочных подвесок маятника. Измерения длины проводить между точками крепления проволоки. Рассчитать приведенную длину по формуле: $L = \frac{\ell_1 \cdot \ell_2}{\ell_1 + \ell_2}$. Результаты записать в таблицу 1.1.

3. Установить первый инерционный диск в рамку маятника. Диск зафиксировать в рамке боковыми зажимами. Записать значение момента инерции диска I_{01} в таблицу 1.1.

4. Подключить сетевой кабель в розетку и нажать клавишу **СЕТЬ**.

5. Отвести рамку по часовой стрелке и зафиксировать положение электромагнитом.

6. Обнулить показания секундомера нажатием клавиши **СБРОС**. Нажать **ПУСК**.

7. Для измерения времени $N=10$ полных колебаний клавишу **СТОП** нажать, когда на счетчике колебаний будет цифра 9.

8. Записать время колебаний в таблицу 1.2.
9. Повторить п.5-8 еще два раза. Рассчитать среднее время движения и период колебаний. Результаты записать в таблицу 1.2.
10. Записать в таблицу 1.1 момент инерции второго диска $I_{\partial 2}$.
11. Установить второй инерционный диск в рамку маятника, не снимая первый. Зафиксировать диски боковыми зажимами.
12. Повторить п. 5-9 с двумя дисками.
13. По формуле (1.16) найти модуль сдвига G стальной проволоки. Учесть, что $I_2 = I_{\partial 1} + I_{\partial 2}$. Результат записать в табл.1.2.

Таблица 1.1

Постоянные величины

$d, \text{ мм}$	$\ell_1, \text{ м}$	$\ell_2, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$I_{\partial 1}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$I_{\partial 2}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	N
						10

Таблица 1.2

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_{\text{ср}}, \text{ с}$	$T = \frac{t}{N}, \text{ с}$	$G, \text{ Па}$
$I_1 = I_{\partial 1}$					$T_1 =$	
$I_2 = I_{\partial 1} + I_{\partial 2}$					$T_2 =$	

2.2. Лабораторная работа № 4.9

ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: определения коэффициента вязкости жидкости и числа Рейнольдса.

Оборудование: стеклянный цилиндр с жидкостью, микрометр, секундомер, шарики.

2.2.1. Описание установки и методика измерения

Всем реальным жидкостям присуще внутреннее трение, называемое вязкостью. Вязкость проявляется в частности в том, что возникшее в жидкости течение после прекращения действия причин, его вызвавших, постепенно прекращается.

Рассмотрим установившееся медленное течение жидкости в трубе круглого сечения (рис.2.1). Ее скорость меняется от нуля в непосредственной близости к стенкам сосуда, до максимума на оси трубы. Жидкость оказывается как бы разделенной на слои, которые скользят друг относительно друга. Такое течение называется ламинарным (слоистым).

Между слоями жидкости действуют силы внутреннего трения, удовлетворяющие соотношению

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta n} \right| S, \quad (2.1)$$

где η - коэффициент динамической вязкости, зависящей от природы и состояния жидкости; $\frac{\Delta v}{\Delta n}$ - градиент скорости, показывающий, как быстро изменяется скорость в перпендикулярном направлении движения слоев; S - площадь слоя. Коэффициент вязкости жидкости, прежде всего, зависит от температуры, уменьшаясь с ее увеличением.

Единица вязкости – паскаль-секунда ($[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$). Это вязкость такой среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости, равном единице, возникает сила внутреннего трения в 1Н на 1м^2 поверхности касания слоев.

Слоистое или ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях. С увеличением скорости характер течения жидкости резко меняется. Происходит интенсивное образование вихрей и перемешивание жидкости. Такое течение называется турбулентным (вихревым). Характер течения определяется значением безразмерной величины, получившей название числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho v \ell}{\eta}, \quad (2.2)$$

где ℓ - характерный размер сечения, например, радиус трубы.

При малых Re течение носит ламинарный характер. Начиная с некоторого значения Re , называемого критическим, течение приобретает турбулентный характер.

Один из методов определения вязкости основан на измерении скорости падения в жидкости медленно движущихся небольших тел сферической формы. При движении тела в смачивающей жидкости очень тонкий ее слой прилипает к поверхности тела и движется с ним как одно целое, увлекая за собой из-за внутреннего трения последующие слои. Характер обтекания тела жидкостью зависит от формы тела и вязкости жидкости. Полное обтекание возможно лишь в случае идеальной жидкости ($\eta=0$). Наличие вязкости приводит к тому, что поток жидкости может отрываться от поверхности тела, в результате чего позади тела возник-

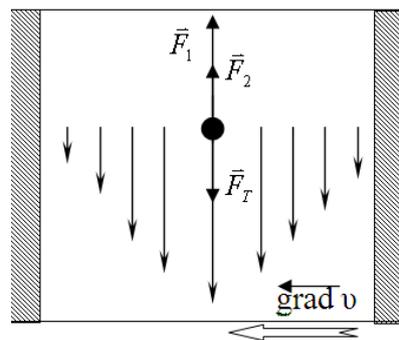


Рис.2.1

кают вихри. Давление в образующейся за телом вихревой области оказывается пониженным, вследствие чего результирующая сил давления отлична от нуля и обуславливает дополнительное сопротивление давления.

Таким образом, при движении тела в жидкости вдоль ее скорости действуют две силы – сила внутреннего трения и сила сопротивления давления, создающие лобовое сопротивление. Соотношение между сопротивлением трения и сопротивлением давления определяется значением числа Рейнольдса.

При малых значениях Re основную роль играет сопротивление трения, так что сопротивлением обусловленного давлением можно пренебречь. По мере увеличения Re роль сопротивления давления все больше растет и становится преобладающей. Стокс установил, что сила сопротивления движению в жидкостях небольших шариков при малых скоростях равна

$$F_1 = 6 \pi \eta r v. \quad (2.3)$$

С учетом того, что на шарик действует еще сила тяжести

$$F_T = mg = 4/3 \pi r^3 \rho_1 g \quad (2.4)$$

и выталкивающая сила

$$F_2 = 4/3 \pi r^3 \rho_2 g, \quad (2.5)$$

где ρ_1 – плотность шарика; ρ_2 – плотность жидкости, уравнение движения принимает вид

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_T$$

или

$$ma = -F_1 - F_2 + F_T. \quad (2.6)$$

Сила F_1 зависит от скорости движения. По достижении некоторой скорости v_0 она станет равной силе $F_T - F_2$, в результате чего движение будет равномерным ($a=0$). Это условие позволяет написать равенство

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_1 - \rho_2) = 6 \pi \eta r v_0, \quad (2.7)$$

Отсюда получим

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho_1 - \rho_2}{v_0} g r^2. \quad (2.8)$$

Так как $r \ll R$, то динамическое влияние стенок трубы радиуса R на оценку коэффициента вязкости η исследуемой жидкости не учитывалось.

2.2.2. Порядок выполнения работы

1.3 аписать табличные для данной установки величины в табл.2.1.

Таблица 2.1

Плотность вещества

Стали $\rho_{ст}, \text{кг/м}^3$	Масла $\rho_{гл}, \text{кг/м}^3$	Свинца $\rho_{св}, \text{кг/м}^3$	Алюминия $\rho_{ал}, \text{кг/м}^3$
7900	870	11340	2600

2. Измерить с помощью микрометра диаметр шарика d и вычислить его радиус $r = d/2$. Записать в табл.2.2 плотность шарика, диаметр и радиус. Опустить шарик в сосуд с жидкостью, как можно ближе к оси цилиндра. Измерив, время t прохождения шарика от верхней метки до нижней и расстояние между ними ℓ , рассчитать установившуюся скорость v_0 движения шарика по формуле $v_0 = \ell/t$. Опыт с разными шариками повторить не менее пяти раз. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	ρ , кг/м^3	d , мм	r , мм	ℓ , м	t , с	v_0 , м/с	η , кг/м с	$ \eta_i - \bar{\eta} $, кг/м с	$ \eta_i - \bar{\eta} ^2$, $\text{кг}^2/\text{м}^2 \text{с}^2$
1									
2									
5									
	Среднее значение						$\bar{\eta} =$		$\Sigma =$

3. По формуле (2.8) рассчитать значение коэффициента динамической вязкости жидкости η . Так как вязкость жидкости сильно меняется с температурой, то необходимо отметить температуру T во время опыта. Рассчитать число Рейнольдса по формуле (2.2). Сделать расчеты погрешностей измерений и записать окончательный результат.

2.3. Лабораторная работа № 4.10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы: Определить экспериментальным путём значение показателя адиабаты $\gamma = C_p/C_v$ для воздуха и сравнить с табличной величиной.

Оборудование: экспериментальная установка, манометр, насос.

2.3.1. Описание установки и методика измерения

Процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, называется адиабатным. Уравнение, связывающее параметры состояния идеального газа в этом процессе (уравнение Пуассона) имеет вид:

$$pV^\gamma = const,$$

где γ – показатель адиабаты.

Показатель адиабаты определяется отношением теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Классическая теория теплоемкостей идеального газа, базирующаяся на законе о равномерном распределении энергии по степеням свободы, устанавливает связь между молярными теплоемкостями и числом степеней свободы молекул

$$C_v = \frac{i}{2}R, \quad C_p = \frac{i+2}{2}R.$$

Тогда показатель адиабаты можно выразить через число степеней свободы:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (3.1)$$

Число степеней свободы i – это число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве – определяется числом атомов в молекуле и характером их связи. В общем случае находится как сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы $i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{вр.}} + 2i_{\text{кол.}}$.

Значения числа степеней свободы и показатели адиабаты для различных молекул представлены в табл. 3.1

Таблица 3.1

Значение числа степеней

Число атомов в молекуле	Характер связи между атомами	Число степеней свободы				Показатель адиабаты γ
		$i_{\text{пост.}}$	$i_{\text{вр.}}$	$2i_{\text{кол}}$	$i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{вр.}} + 2i_{\text{кол}}$	
1	–	3	–	–	3	1,67
2	жесткая	3	2	–	5	4,40

2	упругая	3	2	2	7	1,29
≥ 3	жесткая	3	3	–	6	1,33

Установка состоит из баллона А, соединённого с манометром В и насосом С (рис.3.1). С помощью крана 1 баллон может сообщаться с нагнетающим насосом, а с помощью крана 2 с окружающим воздухом. Если при помощи насоса накачать в баллон некоторое количество воздуха, то давление и температура воздуха внутри баллона по-

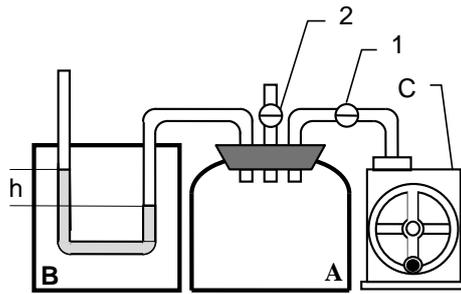


Рис. 3.1

Вследствие теплообмена с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в баллоне, сравнивается температурой внешней среды. Внутри баллона устанавливается давление

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1, \quad (3.2)$$

где p_0 – атмосферное давление, $\rho g h_1$ – добавочное давление, определяемое разностью уровней жидкостей h_1 в манометре, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

Таким образом, состояние воздуха внутри баллона, которое назовём состоянием 1, характеризуется параметрами $(p_0 + \rho g h_1)$, V_1 , T_1 . Если открыть на некоторое время выпускной клапан, то процесс расширения газа можно считать адиабатическим (рис. 3.2).

Давление в сосуде установится равным атмосферному давлению p_0 , температура газа понизится до T_2 , а объём будет

$$V_2 = V_1 + \Delta V,$$

где ΔV - объём воздуха, вышедшего из баллона.

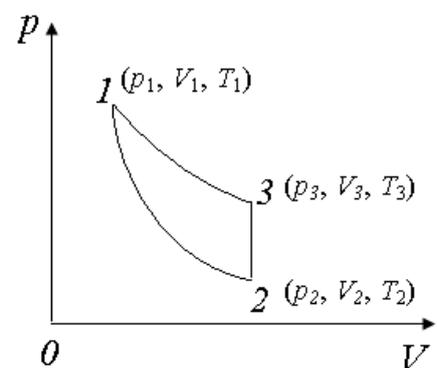


Рис. 3.2

Следовательно, в конце адиабатического процесса (состояние 2) параметрами являются p_0 , V_2 , T_2 . Применяя к состояниям 1 и 2 уравнение Пуассона $pV^\gamma = const$, получим

$$(p_0 + \rho gh_1) \cdot V_1^\gamma = p_0 V_2, \quad (3.3)$$

$$(V_2/V_1)^\gamma = (p_0 + \rho gh_1)/p_0. \quad (3.4)$$

Охладившийся при расширении воздух в баллоне и вне его через некоторое время вследствие теплопроводности нагревается до температуры внешней среды T_1 ; давление возрастает до некоторой величины

$$p_2 = p_0 + \rho gh_2. \quad (3.5)$$

В состояниях 1 и 3 воздух имеет одну и ту же температуру (процесс изотермический). Поэтому можем применить закон Бойля-Мариотта.

$$(p_0 + \rho gh_1) \cdot V_1 = (p_0 + \rho gh_2) V_2. \quad (3.6)$$

Возведя обе части уравнения (3.5) в степень γ ,

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \left(\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0 + \rho gh_2}\right)^\gamma \quad (3.7)$$

и, пользуясь выражением (3.3) и (3.4), получим:

$$\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0} = \left(\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0 + \rho gh_2}\right)^\gamma. \quad (3.8)$$

Логарифмируя последнее выражение и решая полученное относительно γ , находим:

$$\gamma = \frac{\ln(p_0 + \rho gh_1) - \ln(p_0)}{\ln(p_0 + \rho gh_1) - \ln(p_0 + \rho gh_2)}. \quad (3.9)$$

Давления p_0 , $p_0 + \rho gh_1$, $p_0 + \rho gh_2$ мало отличаются друг от друга, поэтому разности логарифмов давлений можно считать пропорциональными разностям давлений и приближённо положить:

$$\gamma = \frac{(p_0 + \rho gh_1) - p_0}{(p_0 + \rho gh_1) - (p_0 + \rho gh_2)}; \quad \gamma = \frac{\rho gh_1}{\rho g(h_1 - h_2)} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (3.10)$$

Таким образом, экспериментальное определение C_p/C_v сводится к измерению разностей уровней жидкости в манометре h_1 и h_2 .

2.3.2. Порядок выполнения работы

1. Закрывать кран 2 и открывать 1. С помощью насоса накачать воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не достигнет 20-25 см.

2. Подождать 2-4 минуты до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды. Определить уровни воды в коленах манометра и их разность h_1 занести в табл. 2.

3. Закрывать кран 1, и открывать кран 2 на малый промежуток времени, пока уровни жидкости не пройдут положение равновесия. Определить новые значения уровней воды в манометре и их разность h_2 занести в табл. 2.

4. Повторить все измерения не менее 5 раз. По формуле (3.10) рассчитать экспериментальные значения γ и определить среднюю величину. Результаты расчетов занести в табл. 3.2.

5. Рассчитать случайную погрешность измерений по формуле

$$\Delta\gamma = t_{\alpha,n} \cdot S_\gamma,$$

где $S_\gamma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\gamma} - \gamma_i)^2}{n(n-1)}}$ - средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для γ ; $t_{\alpha,n}$ - коэффициент Стьюдента, n - число измерений.

6. Рассчитать относительную погрешность измерения по формуле

$$E = \frac{\Delta\gamma}{\bar{\gamma}} 100\% .$$

7. Записать с учетом округления окончательный результат.

8. Сравнить результат эксперимента с теоретическим значением, определить расхождение в процентах.

Таблица 3.2

Результаты расчетов

№ опыта	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	γ	$ \bar{\gamma} - \gamma_i $	$(\bar{\gamma} - \gamma_i)^2$
1					
2					
3					
4					
5					
Средние значения					

2.4. Лабораторная работа № 4.11 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: определение расположения эквипотенциалей, построение силовых линий электрических полей, построение качественной зависимости напряжённости электрического поля от координаты.

Оборудование: установка, состоящая из лабораторного модуля, зонда, выносного элемента, источника питания и вольтметра.

2.4.1. Описание установки и методика измерения

Между напряжённостью электрического поля и электрическим потенциалом существует интегральная и дифференциальная связь:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}), \quad (4.1)$$

$$\vec{E} = -grad\varphi. \quad (4.2)$$

Электростатическое поле может быть представлено графически двумя способами, дополняющими друг друга: с помощью эквипотенциальных поверхностей и линий напряжённости (силовых линий).

Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной поверхностью. Линия пересечения ее с плоскостью чертежа называется эквипотенциалю. Силовые линии электростатического поля - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{E} . На рис. 4.1 пунктирными линиями представлены эквипотенциали, сплошными - силовые линии электрического поля.

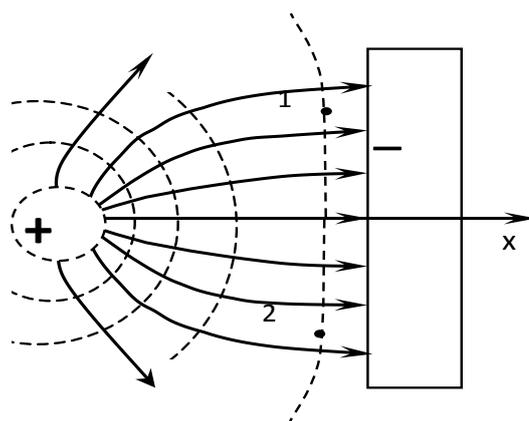


Рис. 4.1

Разность потенциалов между точками 1 и 2 равна нулю, так как они находятся на одной эквипотенциали. В этом случае

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) = 0 \text{ или } \int_1^2 E dl \cos(\vec{E} d\vec{l}) = 0. \quad (4.3)$$

Так как E и dl не равны нулю, то $\cos(\vec{E} d\vec{l}) = 0$, т. е. угол между эквипотенциалью и силовой линией составляет $\pi/2$, так что силовые линии и эквипотенциали образуют «криволинейные квадраты».

Из (4.2) следует, что силовые линии всегда направлены в сторону убывания потенциала. Величина напряжённости электрического поля определяется "густотой" силовых линий; чем гуще силовые линии, тем меньше расстояние между эквипотенциалами. Исходя из этих принципов, можно построить картину силовых линий, располагая картиной эквипотенциалей, и наоборот.

Достаточно подробная картина эквипотенциалей поля позволяет рассчитать в разных точках значение проекции вектора напряжённости \vec{E} на выбранное направление x , усредненное по некоторому интервалу координаты Δx :

$$\langle E_x \rangle = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \approx -\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}, \quad (4.4)$$

где Δx — приращение координаты при переходе с одной эквипотенциали на другую; $\Delta \varphi$ - соответствующее ему приращение потенциала; $\langle E_x \rangle$ — среднее значение проекции E_x между двумя эквипотенциалами.

У поверхности металла напряжённость связана с величиной поверхностной плотности заряда σ соотношением

$$|\sigma| = \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 \left| \frac{\Delta \varphi_n}{\Delta n} \right|, \quad (4.5)$$

где Δn - изменение координаты в направлении, перпендикулярном поверхности металла; $\Delta \varphi_n$ - соответствующее ему приращение потенциала.

Для моделирования электростатического поля удобно использовать аналогию, существующую между электростатическим полем, созданным заряженными телами данной формы в вакууме, и электрическим полем постоянного тока, текущего по проводящей плёнке с однородной проводимостью. При этом расположение силовых линий электростатического поля оказывается аналогично расположению линий электрических токов. То же утверждение справедливо для потенциалов. Распределение потенциалов поля в проводящей плёнке такое же, как в электростатическом поле в вакууме, если оно задано заряженными телами, сечение которых плоскостью плёнки совпадает со «следом», оставляемым моделью электрода на плёнке, а высота бесконечно велика.

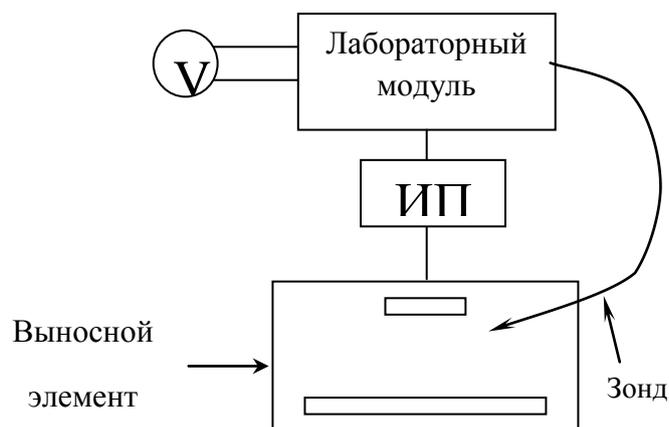


Рис. 4.2

В качестве проводящей плёнки в работе используется электропроводящая бумага с одинаковой во всех направлениях проводимостью.

На бумаге устанавливаются массивные модели электродов, так что обеспечивается хороший контакт между электродом и проводящей бумагой. Для исследования электростатического поля применяется установка (рис.4.2), состоящая из лабораторного модуля, зонда, выносного элемента, источника питания ИП и вольтметра. Выносной элемент представляет собой панель, на которую помещают лист миллиметровой бумаги. На данном листе будут отмечаться точки равного потенциала, а затем строятся эквипотенциальные и силовые линии поля.

Напряжение от источника питания ИП подается на электроды, установленные на электропроводящей бумаге. К модулю также подключаются зонд и вольтметр.

Потенциал зонда равен потенциалу той точки поверхности электропроводящей бумаги, которой он касается. Совокупность точек, для которых потенциал одинаков, и есть изображение эквипотенциали поля. Вольтметр измеряет потенциал точки, которой касается зонд, относительно электрода с нулевым потенциалом. Для построения эквипотенциалей необходимо найти 5-6 точек с одинаковым потенциалом. Нахождение точек осуществляется путем перемещения зонда по электропроводящей бумаге. Для построения модели электростатического поля необходимо определить местонахождение 3 - 4 эквипотенциалей.

2.4.2. Порядок выполнения работы

1. Укрепить на предметном столике (поле изображений) лист миллиметровой бумаги, на котором вы будете отмечать положение точек с одинаковым потенциалом.

2. Включить источник питания и установить по вольтметру на лицевой панели прибора напряжение 9 - 12 В.

3. Касаясь зондом электродов, определить потенциалы электродов и отметить точками их положение на листе миллиметровой бумаги. Контуры электродов определяют крайние эквипотенциали.

4. Перемещая зонд по электропроводящей бумаге, найти и отметить 5-6 точек с одинаковым потенциалом в 1.5 или 2 В. Изображение этих точек необходимо будет зафиксировать на миллиметровой бумаге.

5. Аналогичным образом определить положение других эквипотенциалей, отличающихся друг от друга на одну и ту же разность потенциалов (1.5 – 2В).

6. Отключить лабораторную установку от сети.

7. Снять миллиметровую бумагу с доски и по точкам начертить эквипотенциали. На каждой эквипотенциали отметить соответствующее ей значение потенциала.

8. На картине поля начертить координатную ось x , проходящую через центры электродов. «Ноль» по оси x расположить в центре положительного электрода.

9. В таблицу 4.1 записать координаты и соответствующие им потенциалы точек поля. Построить график $\varphi = f(x)$.

Таблица 4.1

Результаты измерений

№	1	2	3	4	5
φ , В					
x , см					

11. Построить картину силовых линий поля. Густота и направление силовых линий должны соответствовать расположению эквипотенциалей.

12. По формуле (4.4) рассчитать значения напряжённости электрического поля в точках с координатами, расположенных примерно в середине каждой пары эквипотенциалей. Результаты занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений

№	φ_i , В	φ_{i-1} , В	$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$, В	$\langle x_i \rangle$, см	$\langle x_{i-1} \rangle$, см	Δx , см	$\langle E_x \rangle$, В/см
1							
2							
...							

13. Построить график зависимости $\langle E_x \rangle(x)$ по данным табл. 4.2.

16. Рассчитать поверхностную плотность заряда на электродах, используя формулу (4.5).

2.5. Лабораторная работа №4.12 ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: исследование зависимости от времени силы тока на конденсаторе при его зарядке и разрядке через активное сопротивление; определение времени релаксации.

Оборудование: источник питания постоянного тока, конденсатор емкостью 60 мкФ, набор резисторов по 1МОм, плата с гнездами для установления элементов схем, амперметр, переключатель, секундомер, соединительные провода.

2.5.1. Описание установки и методика измерений

В цепи постоянного тока ток протекает через конденсатор только в момент включения или выключения питания. Этот ток заставляет конденсатор заряжаться, пока напряжение на нем не сравняется с приложенным к конденсатору напряжением. Когда питание отключается, конденсатор будет разряжаться, пока напряжение на нем не упадет до нуля.

Пусть конденсатор емкостью C включен в цепь, схема которой представлена на рис.5.1.

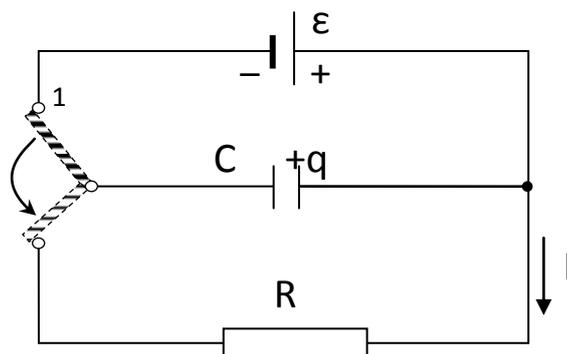


Рис. 5.1.

Тогда ставя переключатель в положение 1, мы будем заряжать конденсатор от источника тока, а, перебрасывая переключатель в положение 2, - разряжать конденсатор.

Рассмотрим сначала процесс зарядки конденсатора. Совмещая направление обхода контура с направлением тока, и применяя правила Кирхгофа, напишем

$$RI + U_C = \xi, \quad (5.1)$$

где I и U_C - мгновенные значения тока в цепи и напряжения на конденсаторе.

Так как $U_C = \frac{q}{C}$, а $I = \frac{dq}{dt}$, то вместо (5.1) будем иметь

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = \xi. \quad (5.2)$$

Поделив это равенство на R , и введя обозначение $\tau = RC$, получим

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{\tau} q = \frac{\xi}{R}. \quad (5.3)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$q = C\xi(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (5.4)$$

Величину $\tau = RC$, имеющую размерность времени, называют временем релаксации. При $t \rightarrow \infty$ $q \rightarrow q_0 = C\xi$. Величина q_0 определяет заряд конденсатора, когда переходный процесс практически завершится и ток в цепи прекратится. Формула напряжения на конденсаторе будет иметь вид

$$U = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (5.5)$$

где $U_0 = \xi$.

Считается процесс зарядки конденсатора законченным по истечению времени τ , когда сила тока в цепи уменьшится в e раз.

Теперь рассмотрим процесс разрядки конденсатора (после переброски переключателя в положение 2). Так как в разрядном контуре источника не имеется, то положив в уравнении (5.4) $\xi = 0$ и учтя начальное условие $q = q_0$, получим уравнение процесса разрядки конденсатора

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.6)$$

Напряжение в этом процессе убывает по закону

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (5.7)$$

Выполняя операцию логарифмирования, получим

$$\ln \frac{U_0}{U} = \frac{1}{RC} t. \quad (5.8)$$

Таким образом, в полулогарифмических координатах эта зависимость носит линейный характер от времени разрядки конденсатора t .

По углу α можно определить время релаксации как

$$\tau = ctg\alpha. \quad (9)$$

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 5.2.

Здесь 1 и 2 – конденсаторы емкостью 30 мкФ и 30 мкФ, соединенные параллельно; 3 – два резистора по 1 МОм; 4- источник питания 0-15 В; 5 – цифровой мультиметр; 6 – секундомер; 7 – соединительные провода; 8 – переключатель.

В работе исследуется зависимость напряжения от времени при зарядке и разрядке конденсатора. Постоянная величина τ составляет в этих экспериментах десятки и сотни секунд, поэтому для наблюдения релаксационных процессов можно использовать измерительные приборы постоянного тока, а время определять с помощью секундомера.

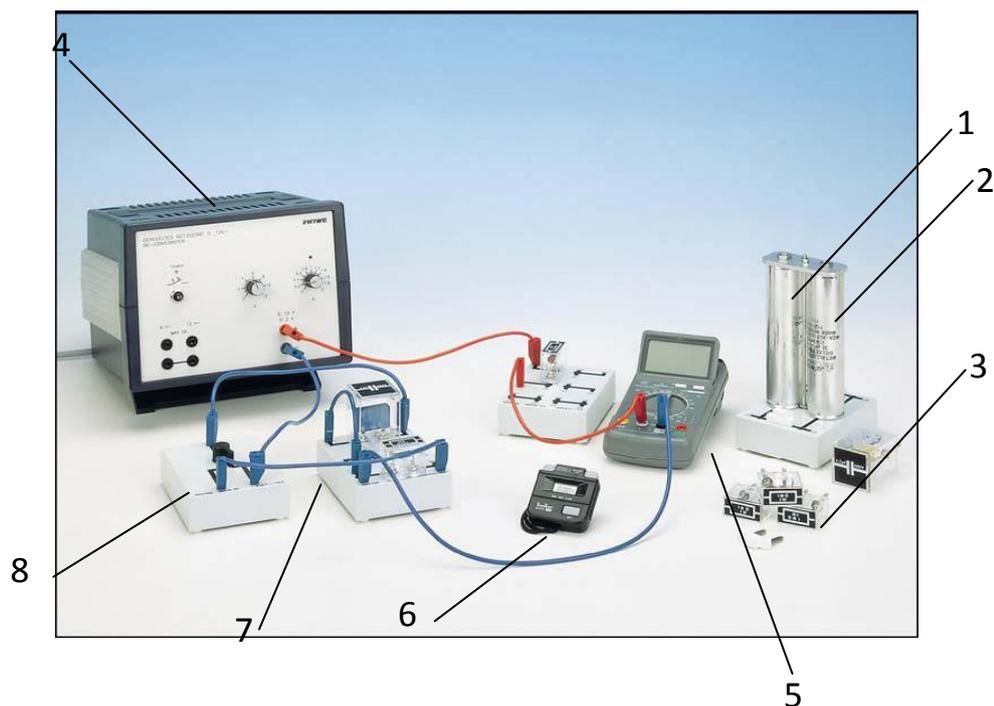


Рис.5.2.

2.5.2. Порядок выполнения работы

1. Включить в цепь резистор сопротивлением 1 МОм.
2. Ручкой источника питания выставить напряжение зарядки $U_0=15В$.
3. Повернуть переключатель в положение зарядки конденсатора и одновременно включить секундомер.
4. С интервалом в 10 с измерять показания времени и напряжения в конденсаторе. Результаты занести в таблицу 5.1.
5. Повернуть переключатель в положение разрядки конденсатора и одновременно включить секундомер.
6. С интервалом в 10с измерять показания времени и напряжения в процессе разрядки конденсатора. Результаты занести в таблицу 5.1.
7. Соединить резисторы последовательно, так чтобы общее сопротивление в цепи составило 2 МОм.
8. Повторить пункты 3-6.
9. Результаты измерений занести в табл. 5.2.

10. Построить графики зависимости $U = f(t)$ при разных значениях сопротивлений для зарядки и разрядки конденсатора.

11. Построить графики зависимости $\ln \frac{U_0}{U} = f(t)$ при разных значениях сопротивлений для разрядки конденсатора. По графику, с использованием формулы (5.9), определить экспериментальное значение времени релаксации.

12. Сравнить экспериментальные времена релаксации для различных значений сопротивлений разрядки, с теоретическими.

Таблица 5.1

Зарядка конденсатора (напряжение источника тока 15 В)

		1 мин							2-3 мин				
R, 1 МОм	t, с	0	10	20	30	40	50	60	80	100	140	160	180
	U, В												
R, 2 МОм	t, с	0	10	20	30	40	50	60	80	100	140	160	180
	U, В												
		4-9 мин											
R, 1 МОм	t, с	220	260	300	340	380	420	460	500	540	580		
	U, В												
R, 2 МОм	t, с	220	260	300	340	380	420	460	500	540	580		
	U, В												

Таблица 5.2

Разрядка конденсатора

		1 мин							2-3 мин				
R, 1 МОм	t, с	0	10	20	30	40	50	60	80	100	140	160	180
	U, В												
	$\ln \frac{U_0}{U}$												
R, 2 МОм	t, с	0	10	20	30	40	50	60	80	100	140	160	180
	U, В												
	$\ln \frac{U_0}{U}$												
		4-9 мин											
R, 1 МОм	t, с	220	260	300	340	380	420	460	500	540	580		
	U, В												
	$\ln \frac{U_0}{U}$												
R, 2 МОм	t, с	220	260	300	340	380	420	460	500	540	580		
	U, В												
	$\ln \frac{U_0}{U}$												

2.6. Лабораторная работа № 4.13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС - ИСТОЧНИКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: определение ЭДС источника постоянного тока.

Оборудование: нуль-гальванометр, кольцевой реохорд, реостат, исследуемый источник, нормальный элемент.

2.6.1. Описание установки и методика измерений

Определение ЭДС (\mathcal{E}) источника с помощью вольтметра всегда даёт заниженный результат из-за падения напряжения на самом источнике $U = \mathcal{E} - Ir$, где r - внутреннее сопротивление источника. Для измерения ЭДС используется компенсационный метод.

Рассмотрим цепь, изображенную на рис.6.1 Здесь \mathcal{E} - батарея источников тока; \mathcal{E}_x - исследуемый источник; G - гальванометр; АВ - кольцевой реохорд; R - реостат, \mathcal{E}_n - нормальный элемент.

Если ЭДС исследуемого элемента меньше, чем батареи, и они включены навстречу друг другу, то на реохорде всегда можно найти такую точку C , когда в ветви AGC результирующий ток I равен нулю.

По второму закону Кирхгофа для контура $AGCA$

$$I_2(r_x + R_g) - I_1 R_{AC} = -\mathcal{E}_x \quad (6.1)$$

где r_x - внутреннее сопротивление исследуемого источника; R_{AC} - сопротивление участка AC ; R_g - сопротивление гальванометра.

Когда ток через гальванометр $I_2 = 0$, то

$$I_1 R_{AC} = \mathcal{E}_x. \quad (6.2)$$

В этом случае падение напряжения на участке AC , создаваемое батареей, равно ЭДС испытываемого элемента (компенсация). Заменим исследуемый элемент нормальным, ЭДС которого \mathcal{E}_n известна.

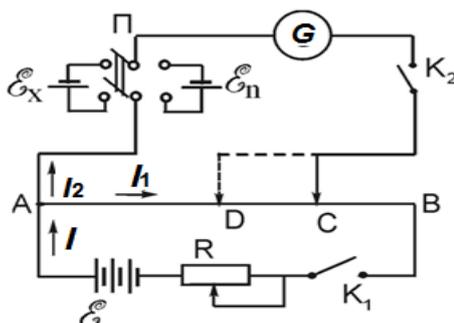


Рис.6.1

Передвигая контакт С вращением ручки кольцевого реохорда, добьемся такого положения движка (положение D), чтобы ток через гальванометр отсутствовал. Тогда выражение (6.2) можно переписать в виде

$$I_1 R_{AD} = \mathcal{E}_n. \quad (6.3)$$

Ток через участок АВ остается прежним, т.к. в ветви, в которую включён гальванометр, тока нет. Разделив (6.2) на (6.3), получим: $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n R_{AC} / R_{AD}$. Ввиду того, что проволока на участке АВ калиброванная, можно записать:

$$\frac{R_{AC}}{R_{AD}} = \frac{AC}{AD} = \frac{l_1}{l_2},$$

где l_1 и l_2 – длины участков AC и AD в произвольных единицах. Поэтому

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{l_1}{l_2}. \quad (6.4)$$

Зная \mathcal{E}_n и измерив $AC = l_1$ и $AD = l_2$, по формуле (6.4) вычисляем искомую ЭДС - \mathcal{E}_x .

В качестве эталона ЭДС часто используется ртутно-кадмиевый нормальный элемент Вестона, имеющий при 20°C $\mathcal{E}_n = 1,0183 \text{ В}$.

Ввиду постоянства ЭДС нормального элемента ее удобно сравнивать с другими неизвестными ЭДС. Поэтому такой элемент применяется исключительно в компенсационных схемах. В целях обеспечения постоянства ЭДС нормального элемента нельзя использовать токи свыше 10^{-5} - 10^{-6} А .

2.6.2. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис.6.1). Необходимо следить за правильным подключением полюсов батарей и исследуемого элемента к реохорду (подключать к точке А одноименными полюсами).

2. Установить движок кольцевого реостата вблизи среднего положения и, включая на короткие промежутки времени ключи K_1 и K_2 , добиться передвиганием ползунка реохорда отсутствия тока через гальванометр.

3. Добившись отсутствия тока через гальванометр при включенном элементе \mathcal{E}_x , записать l_1 и переключателем П включить нормальный элемент. Для него также находят положение движка реохорда при котором гальванометр показывает отсутствие тока.

4. Вычисляют ЭДС исследуемого элемента по формуле (6.4).

5. Аналогичные измерения производят 5 раз при различных значениях сопротивления R и определяют среднее значение ЭДС.

6. Результаты оформляют в виде таблицы 6.1 и вычисляют погрешности.

Результаты измерений и вычислений

Номер опыта	l_1	l_2	$\mathcal{E}_x, \text{В}$	$\mathcal{E}_{\text{ср}}, \text{В}$	$\Delta \mathcal{E}_x, \text{В}$	$\Delta \mathcal{E}_{\text{ср}}, \text{В}$
1						
2						
3						
4						
5						

2.7. Лабораторная работа № 4.14 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ МОСТИКОМ УИТСТОНА

Цель работы: измерение электрического сопротивления проводников методом мостика Уитстона, проверка законов последовательного и параллельного соединений сопротивлений.

Оборудование: установка, содержащая реохорд, магазин сопротивлений, гальванометр, источник тока.

2.7.1. Описание установки и методика измерений

Для измерения сопротивлений в лабораторной практике часто применяют так называемый мостик Уитстона, схема которого дана на рис. 7.1 .

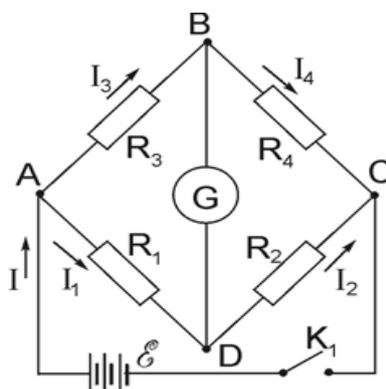


Рис.7.1

Здесь R_1, R_2, R_3, R_4 - сопротивления, составляющие замкнутый контур, в одну из диагоналей которого подключен гальванометр G , а в другую - источник тока \mathcal{E} . При произвольных сопротивлениях R_1, R_2, R_3, R_4 в диагонали BD (мостик), содержащей гальванометр G , будет идти ток, вызывающий отклонение стрелки гальванометра. Подбирая соответствующим образом сопротивления, можно добиться отсутствия тока в гальванометре. В этом случае потенциалы в точках B и D равны: $\varphi_b = \varphi_d$. Тогда весь ток, проходящий через сопротивление R_3 , пройдет

через сопротивление R_4 , и весь ток, проходящий через сопротивление R_1 , пройдет и через сопротивление R_2 , то есть $I_4=I_3$ и $I_2=I_1$.

По закону Ома для отдельных участков цепи имеем:

$$\varphi_a - \varphi_b = I_3 R_3; \quad \varphi_a - \varphi_d = I_1 R_1; \quad \varphi_b - \varphi_c = I_4 R_4; \quad \varphi_d - \varphi_c = I_2 R_2.$$

Так как $\varphi_b = \varphi_d$, то $I_3 R_3 = I_1 R_1$ и $I_4 R_4 = I_2 R_2$. Разделим одно равенство на другое:

$$I_3 R_3 / I_4 R_4 = I_1 R_1 / I_2 R_2.$$

Учитывая, что $I_3 = I_4$ и $I_1 = I_2$, из последнего равенства находим

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4. \quad (7.1)$$

Таким образом, ток, проходящий через гальванометр G , включенный по диагонали BD в мостик Уитстона, равен нулю, когда сопротивления ветвей пропорциональны друг другу.

Из соотношения (1) следует, что неизвестное сопротивление, например $R_x = R_3$, можно определить при помощи трех известных (R_1 , R_2 , R_4), подобранных таким образом, чтобы ток через гальванометр не проходил. Для удобства измерений в качестве сопротивлений R_1 и R_2 используется так называемый кольцевой реохорд – металлическая проволока постоянного сечения по всей длине, намотанная на барабан, по которому перемещается контакт D . В этом случае для сопротивлений R_1 и R_2 можно записать:

$$R_1 = \rho l_1 / s \quad \text{и} \quad R_2 = \rho l_2 / s.$$

Подставив эти значения в формулу (1), получим:

$$R_3 / R_4 = l_1 / l_2. \quad (7.2)$$

Схема мостика Уитстона с реохордом представлена на рис. 7.2. Определяемое сопротивление введено в плечо AB ($R_3 \rightarrow R_x$). Второе плечо BC представляет собой легко изменяемое сопротивление в виде магазина сопротивлений ($R_4 \rightarrow R_0$).

Тогда равенство (7.2) переписывается в виде:

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Отсюда находим величину искомого сопротивления:

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}. \quad (7.3)$$

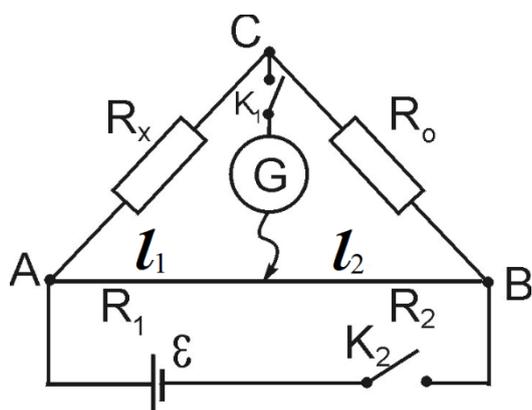


Рис. 7.2

Точность сравнения сопротивлений R_x и R_0 будет больше, когда отношение $\frac{R_x}{R_0} = \frac{l_1}{l_2}$ не очень сильно отличается от единицы. Поэтому при измерении с помощью моста Уитстона неизвестного сопротивления R_x желательно, чтобы сопротивление R_0 мало отличалось от R_x . Погрешность измерения будет минимальной при $l_1 = l_2$ (где l = длина реохорда), т.к. при этом $R_x = R_0$. Поэтому при измерениях необходимо движок реохорда располагать вблизи его середины.

2.7.2. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему по рис. 7.2, включив в плечо АВ одно из неизвестных сопротивлений R_x .

2. Установить движок D реохорда AC на середину шкалы, что соответствует 50 делениям шкалы реохорда. Отношение плеч реохорда l_1 / l_2 в этом случае будет равно единице, так как общее число делений шкалы реохорда равно 100.

3. Замкнуть ключ K_1 и на мгновение - ключ K_2 . Замыкать на более продолжительное время даже уравновешенную схему моста не следует, т.к. нагревание всех частей схемы током вызывает изменение их сопротивления.

Наблюдая за отклонением стрелки гальванометра G, подобрать такое сопротивление R_0 , при котором отклонение стрелки гальванометра будет нулевым.

4. Результаты измерений занесите в табл.7.1. По формуле (7.3) рассчитать неизвестное сопротивление R_{x1} .

5. Повторить пункты 2-4, установив движок реохорда вначале на делении 40, а затем на делении 60. Каждый раз, подбирая на магазине такое сопротивление, при котором показание гальванометра равно нулю. Результаты данных измерений также занести в табл.7.1. Определить среднее значение неизвестного сопротивления R_{x1} по результатам трех измерений.

6. Аналогично определяют величину другого неизвестного сопротивления R_{x2} .

Результаты измерений и вычислений

Номер измеряемого сопротивления	Номер измерения	Результаты измерений				Вычисленные значения
		$R_0, Ом$	l_1/l_2	$R_x, Ом$	$R_{xcp}, Ом$	
1	1					-----
	2					
	3					
2	1					-----
	2					
	3					
Последовательное соединение сопротивлений №1 и №2	1					
	2					
	3					
Параллельное соединение сопротивлений №1 и №2	1					
	2					
	3					

7. Соединить R_{x1} и R_{x2} последовательно и найти общее сопротивление R_x . Проверить справедливость соотношения, имеющего место при последовательном соединении проводников:

$$R_x = R_{x1} + R_{x2} .$$

8. Соединить R_{x1} и R_{x2} параллельно. Найти общее сопротивление. Проверить справедливость соотношения, имеющего место при параллельном соединении сопротивлений:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} , \quad R_x = \frac{R_{x1} R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}} .$$

9. Результаты измерений и вычислений занести в табл.7.1.

2.8. Лабораторная работа № 4.15 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОЛОК ИЗ КОНСТАНТАНА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА

Цель работы: определение сопротивлений проволок из константана различной толщины с помощью моста Уитстона; расчет удельного сопротивления константана.

Оборудование: источник питания постоянного тока, реохорд, набор эталонных резисторов сопротивлением 1, 2 и 5 Ом, плата с гнездами для установления элементов схем, микроамперметр, переключатель, соединительные провода.

2.8.1. Описание установки и методика измерений

Для измерения сопротивлений в лабораторной практике часто применяют так называемый мостик Уитстона, схема которого дана на рис. 8.1.

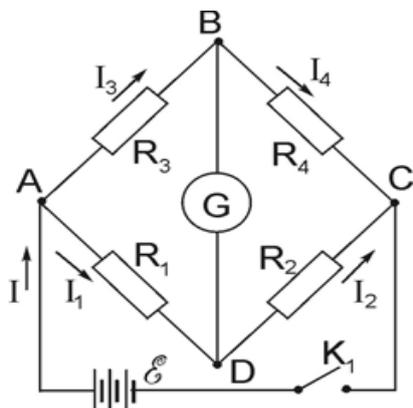


Рис.8.1

Здесь R_1, R_2, R_3, R_4 - сопротивления, составляющие замкнутый контур, в одну из диагоналей которого подключен гальванометр G , а в другую - источник тока \mathcal{E} . При произвольных сопротивлениях R_1, R_2, R_3, R_4 в диагонали BD (мостик), содержащей гальванометр G , будет идти ток, вызывающий отклонение стрелки гальванометра. Подбирая соответствующим образом сопротивления, можно добиться отсутствия тока в гальванометре. В этом случае потенциалы в точках B и D равны: $\varphi_b = \varphi_d$. Тогда весь ток, проходящий через сопротивление R_3 , пройдет через сопротивление R_4 , и весь ток, проходящий через сопротивление R_1 , пройдет и через сопротивление R_2 , то есть $I_4 = I_3$ и $I_2 = I_1$.

По закону Ома для отдельных участков цепи имеем:

$$\varphi_a - \varphi_b = I_3 R_3; \quad \varphi_a - \varphi_d = I_1 R_1; \quad \varphi_b - \varphi_c = I_4 R_4; \quad \varphi_d - \varphi_c = I_2 R_2.$$

Так как $\varphi_b = \varphi_d$, то $I_3 R_3 = I_1 R_1$ и $I_4 R_4 = I_2 R_2$. Разделим одно равенство на другое:

$$I_3 R_3 / I_4 R_4 = I_1 R_1 / I_2 R_2.$$

Учитывая, что $I_3 = I_4$ и $I_1 = I_2$, из последнего равенства находим

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4. \quad (8.1)$$

Таким образом, ток, проходящий через гальванометр G , включенный по диагонали BD в мостик Уитстона, равен нулю, когда сопротивления ветвей пропорциональны друг другу.

Из соотношения (8.1) следует, что неизвестное сопротивление, например $R_x = R_3$, можно определить при помощи трех известных (R_1, R_2, R_4), подобранных таким образом, чтобы ток через гальванометр не проходил. Для удобства измерений в качестве сопротивлений R_1 и R_2 используется реохорд – металлическая проволока постоянного сечения по всей длине, по которой перемещается контакт D . В этом случае для сопротивлений R_1 и R_2 можно записать:

$$R_1 = \rho l_1 / s \quad \text{и} \quad R_2 = \rho l_2 / s.$$

Подставив эти значения в формулу (8.1), получим:

$$R_3/R_4 = l_1/l_2. \quad (8.2)$$

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 8.1.

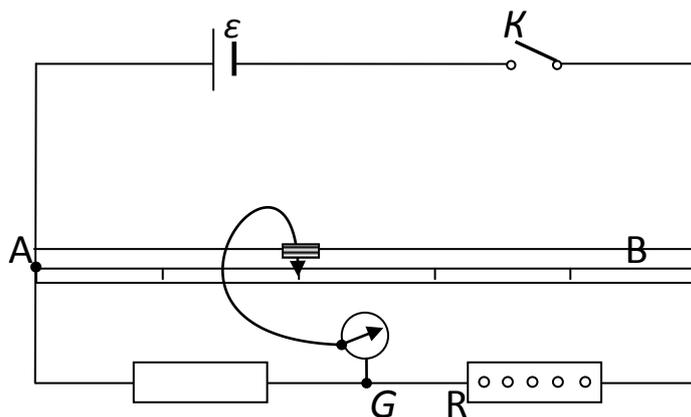


Рис. 8.1.

От источника постоянного тока ε через ключ K идут провода к точкам A и B . Эти точки соединяются однородной тонкой проволокой, натянутой на линейку с делениями (реохорд). Параллельно к реохорду к точкам A и B присоединяются неизвестное сопротивление R_x (резистор) и известное сопротивление R_0 . От точки C идет проводник через гальванометр G к подвижному контакту D , который можно перемещать вдоль реохорда. Движок D делит тонкую проволоку на две части. Одна часть длиной l_1 соответствует сопротивлению R_1 , другая длиной l_2 соответствует сопротивлению R_2 в схеме моста (рис.8.1). Перемещая движок D по проволоке, т.е. меняя длины l_1 и l_2 , можно изменять сопротивления R_1 и R_2 .

Из условия баланса моста Уитстона (8.2) величина неизвестного сопротивления определяется по формуле

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}. \quad (8.3)$$

Таким образом, для измерения R_X необходимо подобрать такие значения R_0 , l_1 и l_2 , чтобы в цепи амперметра отсутствовал ток. В состав установки входят источник питания, микроамперметр, набор резисторов с известными значениями сопротивлений; реохорд – доска с металлической нитью и измерительной линейкой; доска с укрепленными на ней металлическими проволочными резисторами, имеющими одинаковую длину, но различный диаметр; соединительные провода.

2.8.2. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему одинарного моста (рис. 8.2.). В качестве неизвестного сопротивления взять доску с укрепленными на ней проволоками, изготовленными из одного и того же материала, имеющими одну и ту же длину ($L=1\text{м}$), но разные диаметры d (значения диаметров даны в мм; материал проводника указан на доске). В качестве известного сопротивления R_0 использовать последовательно стандартные сопротивления со значениями в 1 и 2 Ом.

2. После проверки рабочей схемы преподавателем провести измерение сопротивления первого резистора. При его первом измерении установить $R_0 = 1$ Ом.

3. Включить источник питания в сеть. Перемещая движок D по проволоке моста, добиться отсутствия тока в цепи микроамперметра. Соответствующие значения длин l_1 и l_2 занести в табл. 8.1. По формуле (8.3) рассчитать значение сопротивления R_{X1} .

4. При втором измерении сопротивления R_{X1} установить $R_0 = 2$ Ом. Добившись отсутствия тока в цепи микроамперметра, вновь занести значения длин l_1 и l_2 в табл. 8.1. Повторно рассчитать значение сопротивления R_{X1} и найти его среднее значение.

5. Для двух других проволочных сопротивлений повторить все изложенное в пп. 1-4.

6. Вычислить площадь поперечного сечения каждой проволоки ($S = \frac{\pi d^2}{4}$).

7. По формуле $\rho = R_X \cdot \frac{S}{L}$ рассчитать удельные электросопротивления для каждой из трех проволок. Найти среднее значение $\langle \rho \rangle$ из полученных результатов. Результаты занести в табл. 8.2.

8. Провести сравнение полученного значения с табличным.

Таблица 8.1

Результаты измерения сопротивлений проволочных резисторов

Номер сопротивления	d, мм	R_0 , Ом	l_1 , м	l_2 , м	R_X , Ом	$\langle R_X \rangle$, Ом
I	1	1				
		2				
II	0,5	1				
		2				
III	0,7	1				
		2				

Расчет удельного сопротивления

Номер сопротивления	R_x , Ом	S , м ²	ρ , Ом·м	$\langle \rho \rangle$, Ом·м
<i>I</i>				
<i>II</i>				
<i>III</i>				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 560 с.
2. Детлаф, А. А. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики [Текст]: в 5 кн.: учеб. пособие для вузов / И. В. Савельев. - М.: АСТ: Астрель, 2005.
4. Яворский Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов [Текст]: учеб. пособие / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. - М.: Оникс, 2006. – 1056 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЙ ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	3
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МИНИМУМ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	3
2.1. Лабораторная работа №4.8	4
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГОГО МОДУЛЯ СДВИГА СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	4
2.2. Лабораторная работа № 4.9	9
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА.....	9
2.3. Лабораторная работа № 4.10	12
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ	12
2.4. Лабораторная работа № 4.11	17
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	17
2.5. Лабораторная работа №4.12	21
ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ КОНДЕНСАТОРА.....	21
2.6. Лабораторная работа № 4.13	25
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ.....	25
2.7.Лабораторная работа № 4.14	27
ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ МОСТИКОМ УИТСТОНА	27
2.8. Лабораторная работа №4.15	30
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОЛОК ИЗ КОНСТАНТАНА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА.....	30
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	34

ФИЗИКА

Методические указания

к выполнению лабораторных работ
по разделам «Механические колебания», «Молекулярная физика
и термодинамика», «Электродинамика» для студентов
строительных специальностей всех форм обучения

Составители:

Тураева Татьяна Леонидовна
Москаленко Александр Георгиевич
Татьянина Елена Павловна
Дубовицкая Татьяна Викторовна
Золототрубов Дмитрий Юрьевич

Подписано к изданию 26.05.2021
Объем данных 1,37 Мб