

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»**

Факультет фундаментальной подготовки

Кафедра физики

Лабораторный практикум по физике

Методические указания к лабораторным работам
по курсу физики для обучающихся всех специальностей
и направлений бакалавриата всех форм обучения

Утверждены на заседании
кафедры
Протокол № 9 от 25.04.2019
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 20.03.01
Протокол № 9 от 29.04.2019
Электронная версия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2019

Оглавление

<i>Лабораторная работа № 1 «Определение объёма тела правильной формы и расчёт погрешностей измерений»</i>	2
<i>Лабораторная работа № 2 «Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса»</i>	8
<i>Лабораторная работа № 3 «Изучение поступательного и вращательного движений с помощью маятника Обербека»</i>	14
<i>Лабораторная работа № 4 «Изучение законов движения системы связанных тел»</i>	20
<i>Лабораторная работа № 5 «Изучение явлений переноса» ...</i>	27
<i>Лабораторная работа № 6 «Определение коэффициента Пуассона для воздуха и расчёт изменения энтропии при его изохорном нагревании»</i>	36
<i>Лабораторная работа № 7 «Изучение электрического поля коаксиальных цилиндров»</i>	41
<i>Лабораторная работа № 8 «Определение диэлектрической проницаемости неполярного диэлектрика и поляризуемости его молекул»</i>	47
<i>Лабораторная работа № 9 «Определение электроемкости конденсатора методом моста Сотти»</i>	54
<i>Лабораторная работа № 10 «Измерение сопротивления методом амперметра – вольтметра»</i>	57
<i>Лабораторная работа № 11 «Определение удельного сопротивления резистивного провода»</i>	63
<i>Лабораторная работа № 12 «Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли» ...</i>	69
<i>Лабораторная работа № 13 «Определение индуктивности катушки»</i>	76
<i>Список рекомендуемой литературы</i>	82

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение объёма тела правильной формы и расчёт погрешностей измерений

1. Цель работы: определить объём цилиндра, конуса или другого тела (по указанию преподавателя); освоить методику расчёта погрешностей прямых и косвенных измерений.

2. Подготовка к работе: прочитать о способах обработки результатов измерений в [1] Приложение, п. 3. Для выполнения работы студент должен: а) уметь пользоваться штангенциркулем и микрометром; б) знать способы расчёта погрешностей при прямых и косвенных измерениях.

3. Выполнение работы

3.1. Виды погрешностей физических величин

Измерением называется сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения – *эталоном*.

Прямыми называют измерения, выполняемые с помощью специальных измерительных приборов. Например, измерение температуры термометром, напряжения – вольтметром и др.

Косвенными называют измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости этой величины от других величин, доступных прямым измерениям.

В результате измерений любой величины *нельзя* получить её истинного значения, что объясняется как принципиально ограниченной возможностью точности измерения, так и природой самих измеряемых объектов. Отклонение измеряемой величины от её истинного значения называется **погрешностью**.

Погрешности, допускаемые при измерениях, бывают *систематические, случайные и грубые*.

Систематические погрешности сохраняют величину и знак от опыта к опыту. Они обусловлены одной и той же величиной, например, приборной погрешностью, неправильным выбором метода измерения, неправильной установкой прибора (сдвинута шкала и т. д.).

Случайными называют погрешности, которые непредсказуемым образом изменяют физическую величину и её знак. Слу-

чайные ошибки устранить нельзя, но они подчиняются статистическим вероятностным закономерностям и могут быть определены методами теории вероятностей. Уменьшить величину случайных погрешностей можно увеличением числа измерений.

Инструментальными (приборными) погрешностями средств измерений называют такие погрешности, которые принадлежат данному средству измерений, и определяются половиной цены деления (или ценой деления) шкалы измерительного прибора.

3.2. Оценка погрешностей прямых измерений

3.2.1. Проведите n измерений физической величины x ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$).

3.2.2. Найдите среднее арифметическое значение результатов измерений

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

3.2.3. Вычислите абсолютные погрешности отдельных измерений Δx_i с учётом знака, поскольку их алгебраическая сумма

должна быть равна нулю, $\sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$:

$$\Delta x_1 = \langle x \rangle - x_1; \quad \Delta x_2 = \langle x \rangle - x_2; \quad \dots; \quad \Delta x_n = \langle x \rangle - x_n.$$

3.2.4. Рассчитайте среднеквадратичную погрешность от среднего арифметического из n измерений

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

3.2.5. Для доверительной вероятности α и числа измерений n найдите коэффициент Стьюдента $t_{\alpha, n}$ (по таблице коэффициентов Стьюдента). Доверительная вероятность выбирается произвольно, но чем она больше (0,999), тем большая точность требуется в измерениях.

3.2.6. Рассчитайте случайную погрешность измеряемой величины x по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \sigma_{\langle x \rangle}.$$

3.2.7. Учтите приборную погрешность $\Delta x_{\text{пр}}$ (как указано выше).

3.2.8. Рассчитайте абсолютную погрешность (доверительный интервал) серии n измерений по формуле

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

3.2.9. Вычислите относительную погрешность прямых измерений

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100 \text{ \%}.$$

3.2.10. Запишите результаты прямых измерений в виде:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x.$$

3.2.11. Результаты прямых измерений и расчёта погрешностей занесите в табл. 1.

Таблица 1

Таблица измерений физической величины и расчёта погрешностей

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

3.3. Оценка погрешностей косвенных измерений

Пусть измеряемая физическая величина представляется функцией

$$f(x, y, z) = \frac{x^\alpha y^\beta}{z^\gamma}.$$

По полученным данным прямых измерений величин x, y, z определите среднее значение искомой величины

$$f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle) = \frac{\langle x \rangle^\alpha \langle y \rangle^\beta}{\langle z \rangle^\gamma}.$$

Абсолютную погрешность искомой величины рассчитайте по формуле

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

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

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

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

Результат косвенных измерений запишите в виде:

$$f(x, y, z) = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle) \pm \Delta f(x, y, z).$$

3.4. *Обработка результатов совместных измерений*

При совместных измерениях надо установить зависимость одной физической величины от другой (или от нескольких других). Чтобы упростить обработку результатов можно ограничиться графическим представлением результатов и определить искомые параметры по графику.

Для **построения графиков** рекомендуется следующий порядок работы:

3.4.1. Составить таблицу численных значений величин, связанных функциональной зависимостью.

3.4.2. По табличным данным построить график зависимости в какой-либо системе координат (в большинстве случаев пользуются декартовой прямоугольной системой координат). Графики должны быть выполнены на листе миллиметровой бумаги размером А4, А5 и вклеены в отчёт. На координатных осях указываются названия величин и их единицы измерения. Затем на координатных осях *равномерно* откладываются масштабные единицы, при этом масштабные деления на разных осях могут быть разные.

3.4.3. Выбрать начало координат и масштаб так, чтобы вся площадь чертежа была использована. При этом не всегда обязательно, чтобы точка пересечения координатных осей совпадала с нулевыми делениями осей x и y .

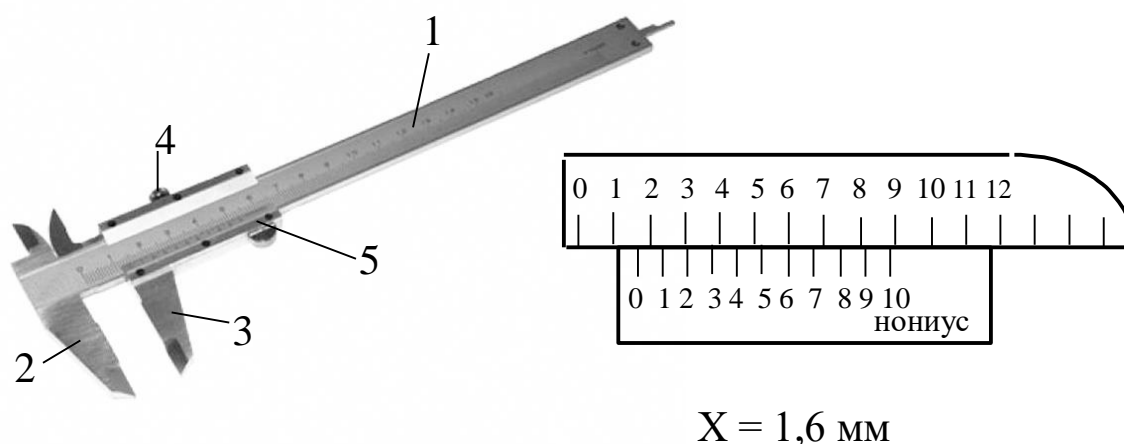
После того как построены оси и указаны деления, нанести экспериментальные точки по табличным данным. Затем провести

плавную кривую, причём она может проходить не через все отмеченные точки, а близко к ним, так чтобы эти точки находились по обе стороны кривой на одинаковом от неё расстоянии, не превышающем абсолютные погрешности данного измерения. Нужно учесть также, что там, где кривая идет монотонно, можно ограничиться небольшим числом точек, а в области перегибов следует точки наносить чаще.

3.5. Приборы для измерения линейных размеров тел

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

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



$$X = 1,6 \text{ мм}$$

Рис. 1. Штангенциркуль:

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

Микрометром (рис. 2) можно произвести измерения небольших толщин, диаметров проволок, шариков с точностью до сотых долей миллиметра.

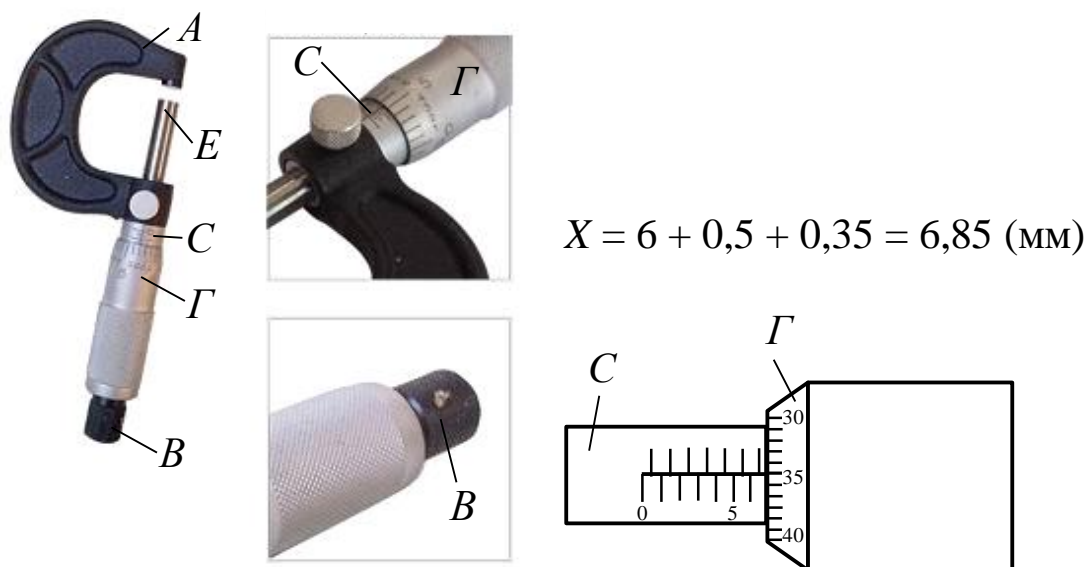


Рис. 2. Микрометр:

A – скоба; EB – микрометрический винт; C – полый стержень; Г – барабан

Микрометр состоит из полого стержня *C*, жёстко соединённого со скобой *A*. В полость стержня ввинчен микрометрический винт *EB*. При повороте микровинта вместе с ним вращается барабан *Г*, перемещаясь при этом поступательно относительно стержня *C*. Наиболее распространён микрометр, у которого цена деления линейной шкалы стержня *C* – 0,5 мм.

Для удобства верхние и нижние риски шкалы стержня *C* сдвинуты относительно друг друга на 0,5 мм, цифры проставлены только у нижней шкалы. Шаг микровинта $h = 0,5$ мм, цена деления микрометра – 0,01 мм (она указывается на приборе).

4. Экспериментальная часть

4.1. С помощью штангенциркуля или микрометра проведите не менее $n = 5$ измерений линейных величин цилиндра, конуса или другого тела (по указанию преподавателя).

4.2. По полученным средним значениям измеренных величин рассчитайте объём тела.

4.3. Определите абсолютную и относительную погрешности измеряемых величин.

4.4. Результаты измерений и расчёта абсолютных погрешностей занесите в таблицы типа 1. Для погрешностей косвенных измерений составьте свою таблицу.

4.5. *Сделайте вывод.*

5. Вопросы для самоподготовки

5.1. В чем заключаются прямые и косвенные измерения физических величин?

5.2. Как рассчитать абсолютную и относительную погрешности при прямых и косвенных измерениях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса

1. Цель работы: а) изучить особенности движения тела в вязкой среде; б) познакомиться с методами определения коэффициента внутреннего трения; в) определить коэффициент внутреннего трения жидкости методом Стокса.

2. Подготовка к работе: прочитать в [1] § 2.4; [2] §§ 6, 31, 32; [3] §§ 5, 8, 42, 43. Для выполнения работы студент должен: а) знать основное уравнение динамики поступательного движения тела; б) уметь рассчитывать силы, действующие на шарик, движущийся в жидкости; в) знать физический смысл коэффициента внутреннего трения и его зависимость от температуры жидкости и газа.

3. Методика измерений и расчёта

В трубках различные слои жидкости движутся с разными скоростями, причём, чем дальше слой от стенки сосуда, тем его скорость больше. При этом слой жидкости с большей скоростью увлекает рядом находящийся слой, движущийся с меньшей скоростью. Слой же с меньшей скоростью, в свою очередь, действует на слой, движущийся с большей скоростью, и тормозит его.

При установившемся движении скорости слоёв остаются постоянными.

Силу, с которой один слой жидкости действует на другой, называют силой внутреннего трения.

Величина силы внутреннего трения зависит от разности скоростей движения слоёв, от расстояния между слоями и площади соприкосновения.

Эта зависимость выражается формулой

$$F = \eta \left| \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x} \right| \Delta S,$$

где \vec{F} – сила внутреннего трения; ΔS – площадь, на которую действует сила трения; $\Delta \vec{v}$ – разность скоростей слоёв, отстоящих на расстояние, равное Δx ; $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x}$ – градиент скорости; η – коэффициент внутреннего трения.

Коэффициент внутреннего трения жидкости можно определить, наблюдая за движением шарика в вязкой среде.

На шарик, перешедший из воздуха в вязкую среду, действуют силы (рис. 1), под действием которых он сначала движется равнозамедленно. Уравнение движения шарика в этой среде согласно II закону Ньютона имеет вид

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = m\vec{a}, \quad (1)$$

где $m\vec{g}$ – сила тяжести; \vec{F}_A – сила Архимеда; \vec{F}_C – сила сопротивления среды.

Сила сопротивления пропорциональна скорости движения шарика \vec{v} и поэтому уменьшается с её уменьшением. В результате через некоторое время движение шарика становится равномерным и подчиняется I закону Ньютона

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0. \quad (2)$$

В проекции на ось X (см. рис. 1)

$$mg - F_A - F_C = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим силы, действующие на шарик, более подробно.

1. Сила тяжести:

$$F_T = m g = \rho V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \quad (4)$$

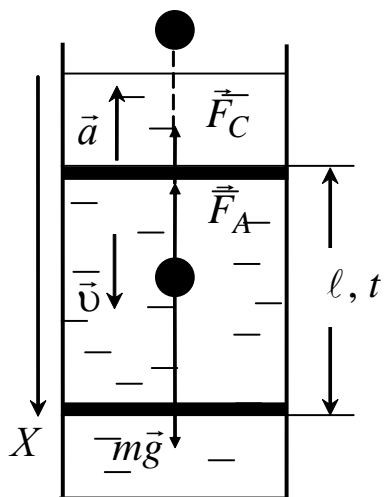


Рис. 1. Схема сил, действующих на движущийся в жидкости шарик

Согласно формуле, выведенной Стоксом, она пропорциональна скорости v шарика, его радиусу r и коэффициенту динамической вязкости (внутреннего трения) η :

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

Сила сопротивления направлена в сторону, противоположную скорости движения шарика. Эта формула справедлива для твёрдого шарика, движущегося в жидкости, при условии, что скорость его невелика, а расстояние до границ жидкости значительно больше диаметра шарика.

Подставим значения сил (4), (5), (6) в исходную формулу (3):

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g - 6 \pi \eta r v_0 = 0, \quad (7)$$

здесь v_0 – скорость установившегося равномерного движения шарика, которая определяется по формуле

$$v_0 = \frac{\ell}{t}, \quad (8)$$

где ℓ – расстояние между метками на измерительном цилиндре с маслом; t – время равномерного движения шарика между этими метками.

Из уравнения (7) с учетом (8) находят коэффициент внутреннего трения:

где ρ – плотность материала шарика; V – объём шарика; r – радиус шарика. Сила тяжести направлена вниз (в направлении движения шарика).

2. Выталкивающая сила (сила Архимеда) направлена вверх и равна:

$$F_A = m_0 g = \rho_0 V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g, \quad (5)$$

где ρ_0 – плотность жидкости; m_0 – масса вытесненной жидкости.

3. Сила сопротивления среды обусловлена вязкостью жидкости.

Сила сопротивления среды обусловлена вязкостью жидкости. Согласно формуле, выведенной Стоксом, она пропорциональна скорости v шарика, его радиусу r и коэффициенту динамической вязкости (внутреннего трения) η :

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

Сила сопротивления направлена в сторону, противоположную скорости движения шарика. Эта формула справедлива для твёрдого шарика, движущегося в жидкости, при условии, что скорость его невелика, а расстояние до границ жидкости значительно больше диаметра шарика.

Подставим значения сил (4), (5), (6) в исходную формулу (3):

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g - 6 \pi \eta r v_0 = 0, \quad (7)$$

здесь v_0 – скорость установившегося равномерного движения шарика, которая определяется по формуле

$$v_0 = \frac{\ell}{t}, \quad (8)$$

где ℓ – расстояние между метками на измерительном цилиндре с маслом; t – время равномерного движения шарика между этими метками.

Из уравнения (7) с учетом (8) находят коэффициент внутреннего трения:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0) g d^2 t}{18 \ell}, \quad (9)$$

где d – диаметр шарика.

4. Экспериментальная часть

4.1. Измерьте диаметр шарика пять раз, результаты измерений занесите в табл. 1.

4.2. Найдите среднее арифметическое значение результатов измерений.

4.3. Вычислите абсолютные погрешности отдельных измерений

$$\Delta d_i = \langle d \rangle - d_i.$$

Алгебраическая сумма этих погрешностей должна быть равна нулю $\sum_{i=1}^5 \Delta d_i = 0$.

4.4. Рассчитайте среднюю квадратичную погрешность

$$\sigma_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum \Delta d_i^2}{n(n-1)}},$$

где n – число измерений.

4.5. Выберите из таблицы коэффициент Стьюдента $t_{\alpha, n}$ для пяти измерений ($n = 5$) и доверительной вероятности α , указанной преподавателем.

4.6. Найдите случайную погрешность

$$\Delta d_{сл} = t_{\alpha, n} \sigma_{\langle d \rangle}$$

4.7. Определите приборную погрешность измерительного инструмента.

4.8. Рассчитайте абсолютную погрешность (доверительный интервал) серии измерений

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_{сл}^2 + \Delta d_{пр}^2}.$$

4.9. Определите относительную погрешность измерений диаметра

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} \cdot 100 \ %.$$

4.10. Результаты расчёта погрешностей прямого измерения занесите в табл. 1. Результат запишите в виде $d = \langle d \rangle \pm \Delta d$.

4.11. Измерьте расстояние ℓ между метками на цилиндре (по верхним краям меток).

4.12. Опустите шарик в цилиндр через воронку. Когда шарик окажется на уровне края верхней метки, включите секундомер. Секундомер выключите, когда шарик достигнет верхнего края второй метки. Следите за тем, чтобы шарик не подходил близко к стенкам сосуда. С помощью магнита извлеките шарик из масла.

Опыт повторите пять раз. Время движения t_i шарика занесите в табл. 2, подобную табл. 1. Таблицу 2 составьте самостоятельно. Определите доверительный интервал прямых измерений времени Δt и относительную погрешность ε_t . Запишите результат измерений в виде: $t = \langle t \rangle \pm \Delta t$.

Таблица 1

Результаты измерения диаметра шарика и расчёта погрешностей

№ п/ п	d_i	$\langle d \rangle$	Δd_i	Δd_i^2	$\sum \Delta d_i^2$	$\sigma_{\langle d \rangle}$	$t_{\alpha, n}$	$\Delta d_{\text{сл}}$	$\Delta d_{\text{пр}}$	Δd	ε_d	$\langle d \rangle \pm \Delta d$	
	мм	мм	мм	мм ²	мм ²	мм	$\alpha = 0,95$	мм	мм	мм	%	мм	
1							2.78						
2													
3													
4													
5													

4.13. Вычислите среднее значение коэффициента внутреннего трения по формуле (9), подставив средние значения прямых измерений диаметра шарика и времени его движения между метками.

4.14. Рассчитайте относительную погрешность результата косвенных измерений коэффициента внутреннего трения по формуле:

$$\varepsilon_{\eta} = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_{\ell}^2},$$

где ε_d , ε_t , ε_{ℓ} – относительные погрешности прямых измерений диаметра шарика d , времени t и расстояния ℓ его равномерного движения в жидкости; $\varepsilon_{\ell} = \frac{\Delta\ell}{\ell}$; $\Delta\ell$ – абсолютная погрешность, которая равна цене деления шкалы линейки, с помощью которой измеряется расстояние ℓ , пройденное шариком при установившемся движении.

4.15. Абсолютную погрешность косвенного измерения рассчитайте по формуле

$$\Delta\eta = \langle \eta \rangle \varepsilon_{\eta}.$$

Результат вычислений запишите в виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta.$$

4.16. Данные измерений и вычислений занесите в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения коэффициента внутреннего трения

$\langle d \rangle$	ℓ	$\langle t \rangle$	ρ	ρ_0	$\langle \eta \rangle$	ε_{η}	$\Delta\eta$
м	м	с	кг/м ³	кг/м ³	Па · с	%	Па · с

4.17. Сделайте вывод.

5. Вопросы для самоподготовки

5.1. Основное уравнение динамики поступательного движения твёрдого тела.

5.2. Физический смысл коэффициента внутреннего трения (динамической вязкости). Как рассчитать кинематическую вязкость и какова её размерность?

5.3. В чём состоит метод определения коэффициента внутреннего трения?

5.4. В каких единицах измеряется коэффициент внутреннего трения?

5.5. Какие силы действуют на шарик, движущийся внутри жидкости?

5.6. Сформулируйте законы Ньютона.

5.7. Изменяется ли сила внутреннего трения в процессе движения шарика? Каков характер этого изменения, если начальная скорость непосредственно после погружения: а) равна нулю; б) равна скорости, которую приобретает шарик, когда падает с высоты h ?

5.8. Как коэффициент внутреннего трения жидкости, газа зависит от температуры?

5.9. Зависит ли коэффициент внутреннего трения жидкости от диаметра шарика?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Изучение поступательного и вращательного движения тел с помощью маятника Обербека

1. Цель работы: освоить методику экспериментального определения кинематических и динамических характеристик движущихся тел с помощью маятника Обербека.

2. Оборудование: крестообразный маятник (маятник Обербека), набор грузов, нить, секундомер, штангенциркуль, линейка.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [2] §§ 2–4, 5–9, 11–13, 16–19; [3] §§ 3–5, 7–9, 16, 24, 26, 32; б) ответить на вопросы для самоподготовки; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия и формулы для расчёта скорости, ускорения, угловой скорости, углового ускорения, массы, силы, импульса, момента силы, момента инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) закон сохранения механической энергии.

4. Выполнение работы

4.1. Описание лабораторной установки

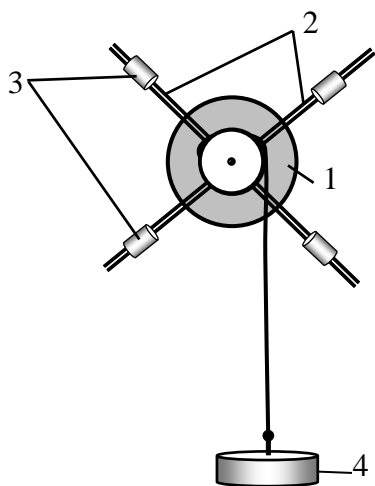


Рис. 1. Схема установки:
1 – шкив; 2 – спицы;
3 – дополнительные грузы;
4 – груз массой m

Маятник Обербека состоит из двухступенчатого шкива 1 и четырёх спиц 2, на которые могут крепиться дополнительные грузы 3. (рис. 1). На шкив (малый или большой) наматывается нить, к свободному концу которой подвешивается груз 4 массой m . При своём падении груз 3 разматывает нить и приводит маятник в ускоренное вращательное движение. После падения груза на пол нить соскальзывает со шкива, и движение маятника становится равнозамедленным до его остановки под действием момента сил трения

в оси маятника.

4.2. Измерения и метод расчёта характеристик поступательного движения груза

4.2.1. Намотайте нить на выбранный шкив. Добавочные грузы на спицах маятника отсутствуют. Задайте высоту h нижнего основания груза относительно «нулевого» уровня ($h_0 = 0$), она во всех опытах должна быть одинаковой (рис. 2). К свободному концу нити подвесьте груз массой m , измерьте время его движения секундомером. Опыт повторите 5 раз. Определите среднее значение времени $\langle t \rangle$ движения груза. Данные измерений и вычислений занесите в табл. 1.

4.2.2. Для определения скорости v груза и его ускорения a в конце его поступательного движения без начальной скорости используйте уравнения

$$h = \frac{at^2}{2} \quad \text{и} \quad v = at, \quad (1)$$

из которых скорость груза и его ускорение в конце t равноускоренного движения определяются соотношениями:

$$v = \frac{2h}{t}; \quad (2)$$

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3)$$

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений
характеристик поступательного движения груза

$h =$ $m =$

№ п/п	t , с	$\langle t \rangle$, с	v , м/с	a , м/с ²	F_H , Н	p , кг·м/с	$W_{\text{п}}$, Дж	$W_{\text{к}}$, Дж
Формула			(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1								
2								
3								
4								
5								

Все характеристики рассчитываются по одному разу, используя среднее значение времени $\langle t \rangle$.

4.2.3. Определите силу натяжения нити, учитывая, что равноускоренное движение груза происходит под действием силы тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нити \vec{F}_H (рис. 2).

При использовании основного уравнения поступательного движения твёрдого тела

$$m\vec{g} + \vec{F}_H = m\vec{a}$$

расчётная формула для определения силы натяжения нити в проекции на направление движения груза примет вид:

$$F_H = m(g - a). \quad (4)$$

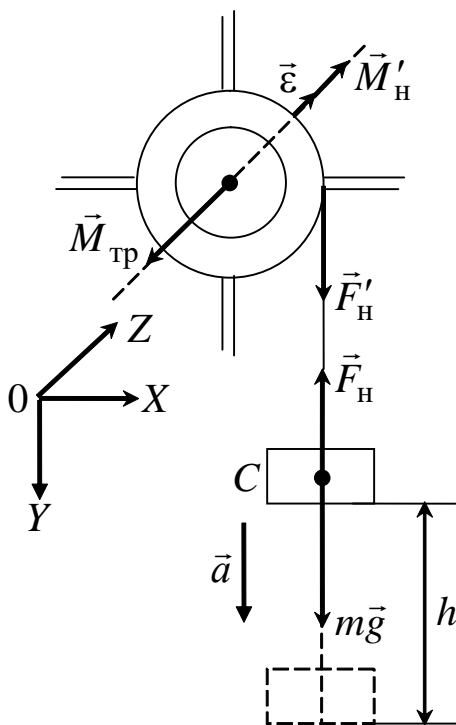


Рис. 2. Схема сил и моментов сил, действующих на груз и шкив маятника

Импульс p поступательно движущегося груза в проекции на ось Y зависит от массы груза и скорости его движения

$$p = m v = \frac{2mh}{t}. \quad (5)$$

4.2.4. Рассчитайте потенциальную энергию $W_{\text{п}}$ груза, поднятого относительно «нулевого» уровня на высоту h (начальный запас энергии системы связанных тел):

$$W_{\text{п}} = mgh. \quad (6)$$

и кинетическую энергию $W_{\text{к}}$ груза в конце его равноускоренного движения

$$W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{2mh^2}{t^2}. \quad (7)$$

Результаты расчёта динамических характеристик поступательного движения груза и полученных значений механической энергии занесите в табл. 1. Сравните полученные значения энергий. Должны ли эти значения быть равными?

4.3. Метод расчёта характеристик вращательного движения крестообразного маятника

Кинематические характеристики вращательного движения крестообразного маятника: угловое ускорение ε , угловая скорость ω , угол поворота φ и число оборотов маятника за время $\langle t \rangle$ его вращения в условиях данного эксперимента определяются при использовании полученных ранее кинематических характеристик поступательного движения груза (см. табл. 1).

Так как нить не проскальзывает по поверхности шкива, то ускорение поступательного движения груза и тангенциальное ускорение a_{τ} точек поверхности шкива совпадают $a_{\tau} = a$. Тогда угловое ускорение ε с учётом формулы (3) определится соотношением

$$\varepsilon = \frac{a_{\tau}}{r} = \frac{2h}{rt^2}, \quad (8)$$

а угловая скорость вращения шкива рассчитывается по формуле

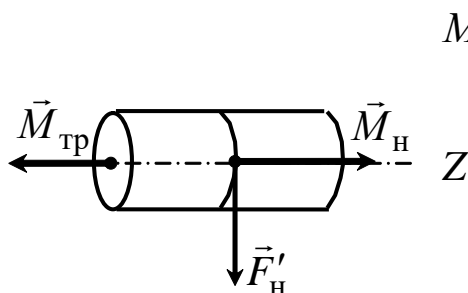
$$\omega = \varepsilon t = \frac{2h}{rt}. \quad (9)$$

Угол поворота φ и число оборотов N за время движения груза определяются соответственно из формул:

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} = \frac{h}{r}, \quad (10)$$

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{h}{2\pi r}. \quad (11)$$

Вращение крестообразного маятника происходит под действием момента силы \vec{M}_H натяжения нити \vec{F}'_H , направленного вдоль оси вращения в сторону, определяемую правилом правого винта (рис. 3), и момента сил трения $M_{тр}$ (сила трения на рис. не указана). Момент силы тяжести маятника относительно оси, совпадающей с осью вращения, равен нулю. Момент силы натяжения нити



$$M_H = r F'_H,$$

где $F'_H = F_H$, так как нить нерастяжима; r – радиус шкива.

Следовательно, момент силы натяжения нити с учётом формулы (4) определится соотношением

$$M_H = r F_H = r m(g - a). \quad (12)$$

Уравнение динамики вращательного движения в проекции на ось вращения крестообразного маятника имеет вид

$$M_H - M_{тр} = J_z \varepsilon, \quad (13)$$

где J_z – момент инерции маятника относительно оси вращения; ε – его угловое ускорение.

Формула (13) позволяет рассчитать момент инерции маятника на основе результатов экспериментального определения моментов действующих сил

$$J_z = \frac{M_H - M_{тр}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

Значение момента сил трения $M_{тр}$ приведено на установке.

4.3.1. Измерьте штангенциркулем диаметр D шкива, рассчитайте его радиус. Используя результаты измерения высоты h

поднятия груза относительно выбранного уровня и среднее время $\langle t \rangle$ движения груза, рассчитайте кинематические характеристики вращательного движения крестообразного маятника. Результаты занесите в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики вращательного движения крестовины

$$r = \quad M_{\text{тр}} =$$

Характеристики	$\langle t \rangle$, с	ε , с ⁻²	ω , с ⁻¹	φ , рад	N , обор.	$M_{\text{н}}$, Н·м	J_z , кг·м ²	L_z , кг·м ² /с
Формула		(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(14)	(15)

4.3.2. Рассчитайте динамические характеристики маятника: момент инерции J_z относительно оси вращения, максимальное значение проекции момента импульса L_z маятника на ось вращения

$$L_z = J_z \omega. \quad (15)$$

Сравните полученное значение с моментом импульса $L_z^{\text{пр}}$ груза относительно оси вращения, движущегося поступательно:

$$L_z^{\text{пр}} = m v r.$$

Должны ли совпадать эти значения?

4.3.3. Рассчитайте кинетическую энергию вращающегося маятника

$$W_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J_z \omega^2}{2} \quad (16)$$

и работу $A_{\text{тр}}$ момента сил трения

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \varphi. \quad (17)$$

Таблица 3

Энергетические характеристики системы тел

Обозначение	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{к}}^{\text{пост}}$	$W_{\text{к}}^{\text{вращ}}$	$A_{\text{тр}}$
Единицы измерения	Дж	Дж	Дж	Дж
Результаты расчёта				

Используя результаты расчётов по формулам (6), (7), (16) и (17), проверьте, все ли потери механической энергии учтены. Результаты расчёта занесите в табл. 3.

4.4. *Сделайте вывод.*

5. Вопросы для самоподготовки

5.1. Какое движение называют поступательным? Вращательным? Приведите кинематические уравнения этих движений.

5.2. Как определяются векторы скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} при поступательном движении?

5.3. Как записывается основной закон динамики поступательного движения?

5.4. Как определяются векторы угловой скорости $\vec{\omega}$ и углового ускорения $\vec{\epsilon}$ при вращательном движении? Как направлены эти векторы?

5.5. Как связаны кинематические характеристики при поступательном и вращательном движении?

5.6. Для каких точек вращающихся твёрдых тел тангенциальное ускорение a_τ одинаково?

5.7. Как определяется момент силы натяжения нити относительно оси вращения?

5.8. Каков физический смысл момента инерции? Приведите пример расчёта момента инерции какого-либо тела.

5.9. Как записывается уравнение динамики вращательного движения?

5.10. Можно ли применять закон сохранения механической энергии при наличии диссипативных сил?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Изучение законов движения системы связанных тел

1. Цель работы: экспериментальное определение кинематических и динамических характеристик системы связанных тел.

2. Оборудование: экспериментальная установка (стойка с вращающимся столиком), стержень, груз с нитью, секундомер, штангенциркуль, масштабная линейка.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [2] §§ 2–4, 5–9, 11–13, 16–19; [3] §§ 3–5, 7–9, 16, 24, 26, 32; б) ответить на вопросы для самоподготовки; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы необходимо знать: а) основные кинематические и динамические параметры поступательного и вращательного движения (скорость, ускорение, угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение, масса, сила, момент силы, момент инерции); б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) закон сохранения механической энергии.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стойки с укрепленным на ней с помощью подшипника шкивом, радиус которого r , и столика, жестко связанного со шкивом. Шкив и столик имеют общую ось вращения Z . На шкив наматывается нить, перекинута через блок, ко второму концу которой подвешивается груз массой m . Опускаясь с высоты h , груз приводит во вращательное движение шкив со столиком. Считая нить нерастяжимой, пренебрегая её массой и массой блока, можно рассматривать данную систему как систему двух связанных тел. При этом масса m груза должна быть достаточной для обеспечения равноускоренного движения указанных тел.

4.2. Методика измерений и расчёта кинематических характеристик

4.2.1. Намотайте на шкив нить, перекиньте её через блок и к свободному концу нити прикрепите груз. С помощью масштабной линейки задайте высоту h груза относительно выбранного уровня (во всех опытах эта величина должна быть одинаковой). Отпуская груз, заданной массы m , одновременно включите секундомер, выключите его, когда груз достигнет этого уровня. Определите время t падения груза не менее 5 раз. Измерьте штангенциркулем диаметр D шкива, рассчитайте его радиус. Данные измерений занесите в табл. 1.

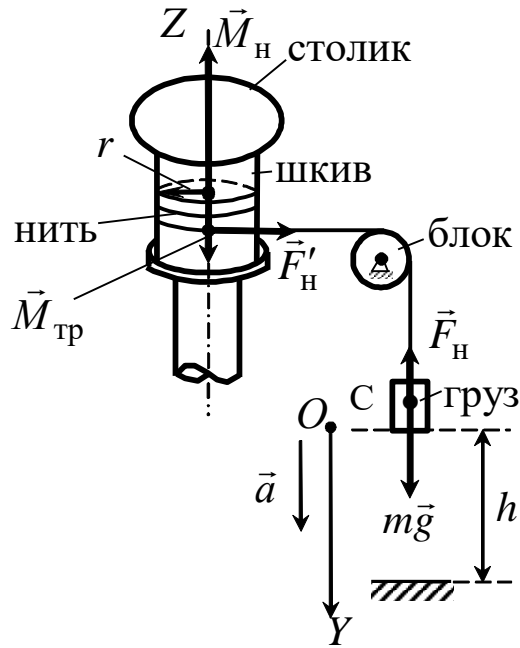


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

4.2.2. Для определения скорости груза v и ускорения a в конце его поступательного движения направим ось OY вдоль движения груза (см. рис. 1). Так как начальная скорость груза равна нулю, то проекция v_y скорости его движения на выбранную ось имеет вид:

$$v_y = a_y t, \quad (1)$$

где a_y – проекция вектора \vec{a} ускорения груза; t – время его движения. Координата y груза со временем изменяется по уравнению

$$y = \frac{a_y t^2}{2}. \quad (2)$$

Пройденный грузом путь вдоль оси OY за время t равен $\Delta y = h$. Решая систему уравнений (1) и (2), находим расчетные формулы для конечной скорости груза $v = v_y$

$$v = \frac{2h}{t} \quad (3)$$

и его ускорения $a = a_y$

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (4)$$

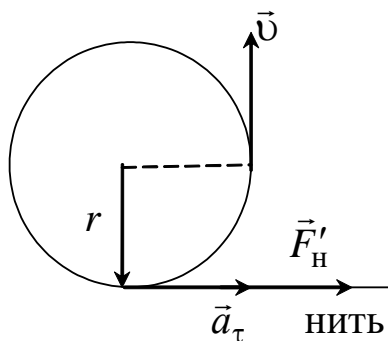
Все кинематические характеристики рассчитываются по одному разу, используя среднее значение времени $\langle t \rangle$.

Таблица 1

Кинематические характеристики движения груза и шкива со столиком

	$h =$	$r =$	$m =$					
№ п/п	$t, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$v, \text{ м/с}$	$a, \text{ м/с}^2$	$\omega, \text{ с}^{-1}$	$\varepsilon, \text{ с}^{-2}$	$\varphi, \text{ рад}$	$N, \text{ об}$
Формула			(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1								
2								
3								
4								
5								

4.2.3. Равноускоренное вращательное движение шкива со столиком происходит под действием силы натяжения нити \vec{F}'_H , создаваемой грузом. Точки поверхности шкива вращаются с тангенциальным ускорением a_τ , равным ускорению a поступательного движения груза (нить нерастяжима). Равны линейная скорость точек поверхности шкива и скорость v поступательного движения груза. Вращение столика со шкивом является равноускоренным без начальной угловой скорости. Линейные (v, a_τ) и угловые (ω, ε) характеристики в момент времени t связаны соотношениями



$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{rt}; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r} = \frac{2h}{rt^2}, \quad (6)$$

Рис. 2. Поперечное сечение шкива

где r – радиус шкива.

4.2.4. Используя значения t, ε, h и r , рассчитайте угол φ поворота радиуса

шкива

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{h}{r} \quad (7)$$

и число N его оборотов

$$N = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (8)$$

Результаты расчёта косвенных измерений занесите в табл. 1.

4.2.5. Положите на столик стержень так, чтобы его центр масс находился на оси вращения Z . Повторите измерения времени t падения груза с заданной высоты h . Вычислите кинематические характеристики груза и столика со стержнем. Результаты занесите в табл. 2 (аналогична табл. 1).

4.3. Методика расчёта динамических характеристик

Для системы двух связанных тел (шкив со столиком и груз на нити) необходимо записать два динамических уравнения. Поступательное движение груза с ускорением \vec{a} обеспечивается действием его силы тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нити \vec{F}_H . Основное уравнение поступательного движения груза массой m в этом случае записывается в виде

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_H. \quad (9)$$

Проецируя его на ось OY , получим формулу для расчёта силы натяжения нити:

$$F_H = m(g - a). \quad (10)$$

На столик со шкивом действуют момент силы \vec{M}_H натяжения нити \vec{F}'_H и момент силы $\vec{M}_{\text{тр}}$ трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ в подшипнике шкива (вектор силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ на рис. 1 не приведен). Уравнение динамики вращательного движения шкива со столиком имеет вид:

$$\vec{M}_H + \vec{M}_{\text{тр}} = J_z \vec{\varepsilon}, \quad (11)$$

где $\vec{M}_H = [\vec{r}\vec{F}'_H]$ – момент силы натяжения нити; J_z – момент инерции шкива со столиком относительно оси Z ; $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение шкива со столиком.

В проекции на ось вращения Z (см. рис. 1) уравнение (11) примет вид

$$M_H - M_{\text{тр}} = J_z \varepsilon. \quad (12)$$

Равноускоренное вращение столика и шкива обусловлено действием момента силы натяжения нити

$$M_{\text{н}} = r F'_{\text{н}},$$

где $F'_{\text{н}} = F_{\text{н}}$, так как нить нерастяжима.

Следовательно,

$$M_{\text{н}} = r F_{\text{н}} = r m (g - a). \quad (13)$$

Момент силы трения $M_{\text{тр}}$ приведён на установке. Тогда момент инерции J_z шкива со столиком определится соотношением:

$$J_z = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

4.3.1. Рассчитайте динамические характеристики груза и столика со шкивом в обеих сериях опытов, используя значения кинематических характеристик, внесенных в табл. 1 и 2.

Экспериментальное значение момента инерции стержня определите из соотношения

$$J_z^{\text{эк}} = J_{z2} - J_{z1}, \quad (15)$$

где J_{z1} – момент инерции столика со шкивом; J_{z2} – момент инерции столика со шкивом и стержнем на столике.

Результаты измерений занесите в табл. 3.

4.3.2. Для расчёта теоретического значения момента инерции стержня относительно оси, перпендикулярной к образующей и проходящей через его центр масс, измерьте штангенциркулем радиус R стержня и его длину ℓ (масса стержня приведена на установке). С учетом параметров стержня рассчитайте теоретическое значение его момента инерции

$$J_z^{\text{теор}} = m_{\text{ст}} \left(\frac{1}{4} R^2 + \frac{1}{12} \ell^2 \right). \quad (16)$$

4.3.3. Для однородного прямоугольного стержня

$$J_z^{\text{теор}} = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} (\ell_1^2 + \ell_2^2), \quad (17)$$

где $m_{\text{ст}}$ – масса стержня; ℓ_1 – длина стержня; ℓ_2 – ширина стержня.

4.3.4. Оцените расхождение экспериментального и теоретического значения момента инерции стержня по формуле

$$\varepsilon_J = \frac{|J_z^{\text{экс}} - J_z^{\text{теор}}|}{J_z^{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Таблица 3

Динамические характеристики системы связанных тел

$$m_{\text{ст}} =$$

$$R =$$

$$l =$$

Характеристики, формула	F_H (10)	M_H (13)	$M_{\text{тр}}$	J_{z1} (14)	J_{z2} (14)	$J_z^{\text{экс}}$ (15)	$J_z^{\text{теор}}$ (16)	ε_J (17)
	Н	Н·м	Н·м	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	%
Без стержня на столике					—			
Со стержнем на столике				—				

4.4. Проверка закона сохранения энергии

4.4.1. Для одного из двух случаев рассчитайте механическую энергию системы связанных тел и работу момента сил трения. Начальный запас механической энергии системы определяется потенциальной энергией груза массой m , поднятого относительно нулевого уровня ($h = 0$),

$$W_{\text{п}} = mgh. \quad (19)$$

При движении груза эта энергия расходуется на увеличение его кинетической энергии и кинетической энергии вращающегося шкива и столика в первой серии опытов и шкива, столика и стержня на нем во второй серии опытов.

Кинетическая энергия груза в конце поступательного движения:

$$W_{\text{к}}^{\text{пост}} = \frac{mv^2}{2}; \quad (20)$$

кинетическая энергия вращательного движения столика со шкивом

$$W_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J_z \omega^2}{2}. \quad (21)$$

Кроме того, при учёте сил трения часть механической энергии затрачивается на работу против этих сил. Работа момента сил трения за время ускоренного вращения столика равна

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \varphi. \quad (22)$$

Используя соотношения (19)–(22), проверьте, все ли потери механической энергии системы тел учтены. Расчёты занесите в табл.4.

Таблица 4

Энергетические характеристики системы связанных тел

Обозначение	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{к}}^{\text{пост}}$	$W_{\text{к}}^{\text{вращ}}$	$A_{\text{тр}}$
Единицы измерения	Дж	Дж	Дж	Дж
Результаты расчета				

4.5. *Сделайте вывод.*

5. Вопросы для самоподготовки

Ответьте на вопросы для самоподготовки, предложенные в лабораторной работе № 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Изучение явлений переноса

1. Цель работы: определение коэффициента внутреннего трения методом Пуазейля, расчёт длины свободного пробега молекул воздуха, коэффициентов диффузии, теплопроводности и числа Рейнольдса.

2. Подготовка к работе: изучить по учебникам [1] 10.7; [2] §§ 41–48. Для выполнения лабораторной работы студент должен: а) знать основные положения молекулярно-кинетической теории газов; б) объяснить явления переноса (диффузии, теплопроводности, внутреннего трения) с точки зрения молекулярно-

кинетической теории; в) уметь пользоваться измерительными приборами и рассчитывать погрешности измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для изучения явлений переноса состоит из двух модулей (рис. 1). В модуле I расположены два сосуда 6 и 9 (рис. 2), соединённые трубкой 8. В модуле II расположен компрессор, соединённый с сосудом 6 через клапан 1 (К1) с помощью шланга 10. После включения компрессора и нажатия клапана К1 вода по трубке 8 вытесняется в сосуд 9. Мерная трубка 7 позволяет следить за уровнем жидкости в сосуде 6. Когда уровень воды в мерной трубке 7 достигает уровня 140, компрессор выключают и отпускают клапан К1. После нажатия клапана 2 (К2) выравниваются давления в сосуде 6, левом колене манометра 5 (рис. 2) и на конце «а» капиллярной трубки 3. Вследствие этого на концах капиллярной трубки 3 создается разность давлений, которая измеряется манометром 5. Благодаря возникшей разности давлений воздух протекает через капиллярную трубку в атмосферу. Объём этого воздуха можно считать равным объёму воды, перетекающей из сосуда 9 в сосуд 6.

3.2. Методика измерений и расчёта

Если в газе существует градиент плотности, температуры или скорости движения отдельных слоев газа, то происходит выравнивание этих параметров за счёт возникающих потоков вещества, энергии или импульса упорядоченного движения частиц, то есть наблюдаются явления переноса: диффузия, теплопроводность, внутреннее трение.

1. *Диффузия* – явление самопроизвольного взаимного проникновения и перемешивания частиц двух соприкасающихся веществ (например, газов). Перенос вещества при диффузии подчиняется закону Фика:

$$dM = D \left| \frac{d\rho}{dx} \right| dS_{\perp} dt, \quad (1)$$

где dM – масса переносимого вещества через площадку dS_{\perp} , расположенную перпендикулярно направлению переноса моле-

кул, за время dt ; $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности: изменение плотности вещества в направлении, перпендикулярном направлению переноса; D – коэффициент диффузии, равный

$$D = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle. \quad (2)$$

Здесь $\langle u \rangle$ – средняя скорость теплового движения молекул, $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

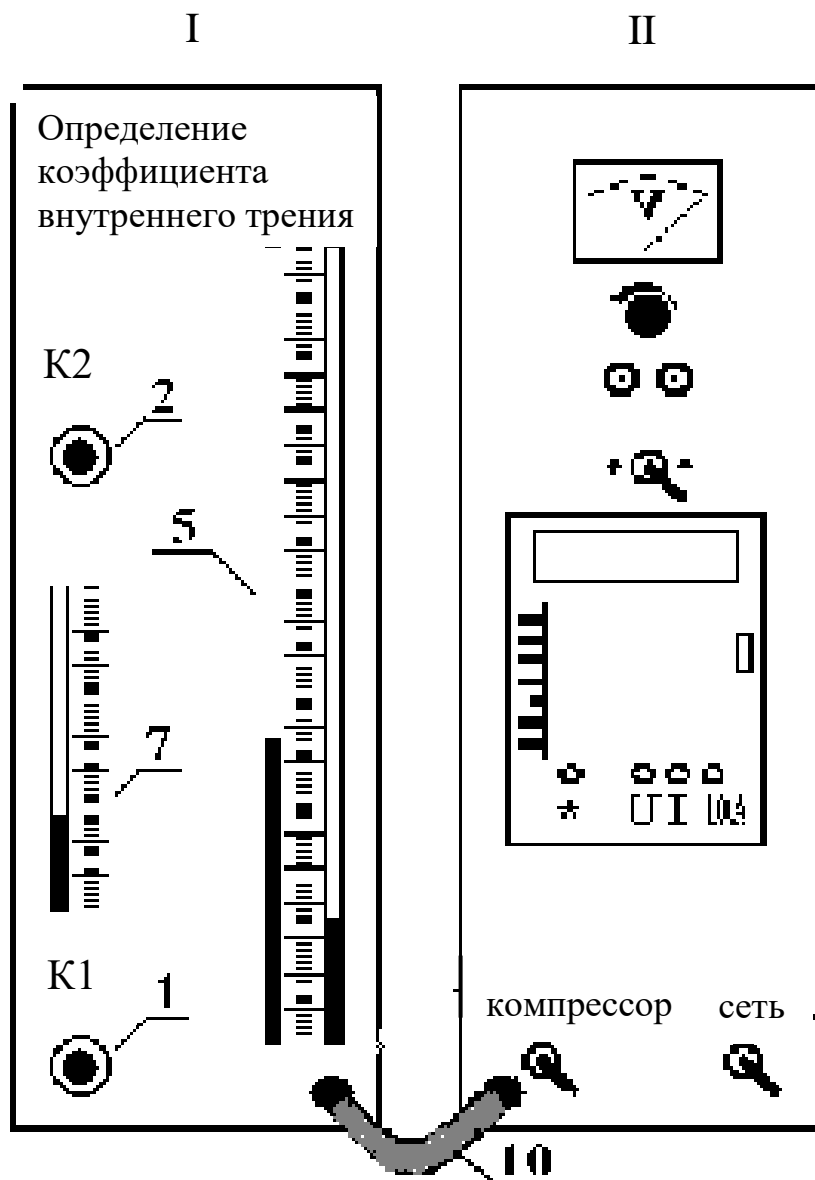


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Средняя длина свободного пробега молекул – среднее расстояние, которое молекула свободно проходит между двумя последовательными столкновениями:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_{m\text{эф}}^2 n_0}, \quad (3)$$

где $d_{m\text{эф}}$ – эффективный диаметр молекул, n_0 – их концентрация.

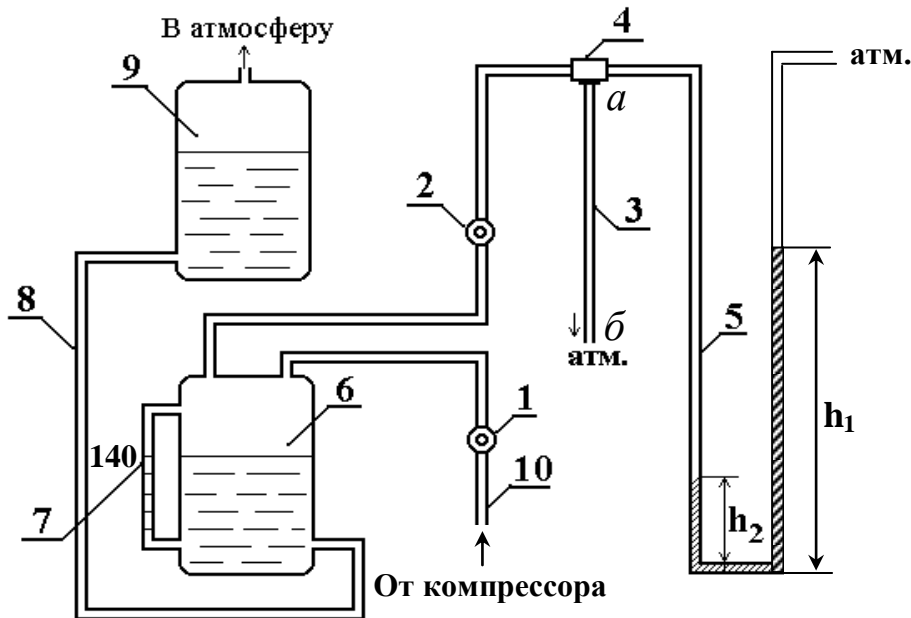


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – клапан $K1$; 2 – клапан $K2$; 3 – капиллярная трубка;
 4 – тройник для соединения сосуда б с капиллярной трубкой и манометром; 5 – манометр; б – емкость с жидкостью;
 7 – мерная трубка; 8 – трубка, соединяющая емкость б с сосудом 9; 10 – шланг, соединяющий емкость б с компрессором

Средняя арифметическая скорость теплового движения молекул определяется по формуле:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad (4)$$

где R – газовая постоянная; T – термодинамическая температура; M – молярная масса газа.

2. Теплопроводность – это перенос теплоты от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры:

$$\delta Q = k \left| \frac{dT}{dx} \right| dS_{\perp} dt, \quad (5)$$

где δQ – количество теплоты, переносимого через площадку dS_{\perp} , расположенную перпендикулярно направлению переноса теплоты, за время dt ; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температур: изменение температуры на единицу длины в направлении, перпендикулярном направлению переноса; k – коэффициент теплопроводности, равный

$$k = \frac{1}{3} \rho c_{V\text{уд}} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle. \quad (6)$$

Здесь ρ – плотность газа; $c_{V\text{уд}}$ – удельная теплоемкость газа при постоянном объёме. Для идеального газа $c_{V\text{уд}}$ рассчитывается по формуле:

$$c_{V\text{уд}} = \frac{i}{2} \frac{R}{M}, \quad (7)$$

где i – число степеней свободы молекулы: число независимых координат, определяющих положение частицы в пространстве. Воздух в основном состоит из двухатомных молекул, поэтому число степеней свободы молекул воздуха $i = 5$.

3. *Внутреннее трение (вязкость)* – возникает при относительном перемещении параллельно движущихся слоёв газа вследствие того, что слои обмениваются молекулами из-за их хаотического теплового движения. В результате такого обмена импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, то есть на него действует "тормозящая" сила (сила трения). Импульс слоя, движущегося медленнее, увеличивается, то есть на него действует "ускоряющая" сила. Величина силы внутреннего трения определяется законом Ньютона:

$$dF = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| dS, \quad (8)$$

где dF – касательная сила трения, действующая на поверхность слоя площадью dS ; $\frac{dv}{dx}$ – градиент скорости: изменение скорости слоев газа (скорости упорядоченного движения молекул газа) на расстоянии dx в направлении внешней нормали \vec{n} к их поверхности; η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость), который рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle \rho, \quad (9)$$

где ρ – плотность газа (воздуха).

Коэффициент внутреннего трения воздуха можно определить методом Пуазейля:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) R^4 \pi t}{8bV},$$

где R – радиус капиллярной трубки; b – длина капилляра.

Разность давлений $(p_1 - p_2)$ находится по разности уровней Δh воды в манометре 5 (см. рис. 2):

$$p_1 - p_2 = \rho_{\text{ж}} g (h_1 - h_2) = \rho_{\text{ж}} g \Delta h,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в манометре.

Объём V воздуха, протекающего за время t через капиллярную трубку равен объёму воды, перетекающей из сосуда 9 в сосуд 6, его находим по формуле $V = \frac{1}{4} \pi d_c^2 \Delta H$, где d_c – диаметр сосуда 6; ΔH – изменение уровня воды в сосуде 6, которое определяем по мерной трубке 7.

С учетом вышесказанного

$$\eta = \frac{\rho_{\text{ж}} g d^4}{32 d_c^2 b} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta H} t, \quad (10)$$

где $d = 2R$ – диаметр капиллярной трубки.

Тогда

$$\eta = A \frac{\Delta h}{\Delta H} t, \quad (11)$$

где $A = \frac{\rho_{\text{ж}} g d^4}{32 d_c^2 b}$ (Па).

Среднюю по сечению скорость $\langle v \rangle$ движения воздуха через площадку S за время t находим по формуле:

$$\langle v \rangle = \frac{V}{St} = \frac{4V}{\pi d^2 t} = \frac{d_c^2 \Delta H}{d^2 t}. \quad (12)$$

Число Рейнольдса, по величине которого можно судить о характере движения воздуха по цилиндрической трубке, определяется по формуле:

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta}, \quad (13)$$

где ρ – плотность воздуха.

Если $Re < 1100$ – характер течения воздуха ламинарный, если $1100 < Re < 2000$ – характер течения неустойчивый, при $Re > 2000$ – течение газа турбулентное.

3.3. Экспериментальное определение вязкости воздуха

3.3.1. По манометру 5 запишите первоначальное положение уровней h_0 жидкости.

3.3.2. Включите (рис. 1) тумблеры "Сеть", "Компрессор" и нажмите на клапан К1. По стеклянной мерной трубке 7 следите за перемещением уровня воды. При достижении нижним краем мениска отметки 140 выключите тумблер "Компрессор", отпустите клапан К1, выключите тумблер "Сеть".

3.3.3. Нажмите клапан К2 и после прохождения нижним краем мениска жидкости примерно 5 делений, включите секундомер и измерьте время t прохождения мениском 10 делений мерной трубки 7: $\Delta H = 10$ мм. Одновременно заметьте положение верхнего уровня жидкости h_b по манометру 5. Найдите $\Delta h = 2(h_b - h_0)$. Результаты измерений занесите в таблицу.

3.3.4. По формуле (11) рассчитайте коэффициент внутреннего трения воздуха η .

3.3.5. Пункты 3.3.2–3.3.4 повторите 5 раз. При необходимости подкачайте компрессором воду в сосуд 9 (в соответствии с п. 3.3.2) так, чтобы $\Delta H = 10$ мм.

3.3.6. Найдите отклонение экспериментального значения коэффициента внутреннего трения воздуха от его табличного значения по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\eta_T - \eta_{\text{э}}|}{\eta_T} \cdot 100 \%,$$

где $\eta_T = 1,85 \cdot 10^{-5}$ Па · с.

3.3.7. Результаты измерений и расчёта занесите в таблицу.

3.4. *Определение средней длины свободного пробега молекул воздуха $\langle \lambda \rangle$ и коэффициента диффузии D*

3.4.1. По формуле (4) рассчитайте среднюю арифметическую скорость теплового движения молекул (для воздуха $M = 0,029$ кг/моль).

3.4.2. Из уравнения Менделеева – Клапейрона вычислите плотность воздуха ρ (давление воздуха принять равным $P = 1 \cdot 10^5$ Па).

Таблица

Результаты измерений и расчёта величин, характеризующих явления переноса воздуха

$$h_0 =$$

№ П/ П	t_i	h_B	ΔH	Δh_i	η_i	$\langle \eta \rangle$	ε	$\langle u \rangle$	ρ	$\langle \lambda \rangle$	D	k	Re
	с	мм	мм	мм	Па с	Па с	%	$\frac{м}{с}$	$\frac{кг}{м^3}$	м	$\frac{м^2}{с}$	$\frac{Н}{с \cdot К}$	
1													
2													
3													
4													
5													

3.4.3. Из формулы (8) найдите среднюю длину свободного пробега молекул $\langle \lambda \rangle$.

3.4.4. По формуле (2) рассчитайте коэффициент диффузии. Результаты вычислений занесите в таблицу.

3.5. *Определение коэффициента теплопроводности k*

3.5.1. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов $P = n_0 k T$ найдите концентрацию молекул воздуха.

3.5.2. Из формулы (3) найдите эффективный диаметр молекул $d_{m \text{эф}}$.

3.5.3. Сравните эффективный диаметр молекул $d_{m\text{эф}}$, среднюю длину свободного пробега $\langle\lambda\rangle$ и диаметр капиллярной трубки d (проверьте, выполняется ли требуемое неравенство):

$$d_{m\text{эф}} \ll \langle\lambda\rangle \ll d.$$

Если данное неравенство соблюдено, то найдите коэффициент теплопроводности по формуле (6) с учетом (7) и (9). Проверьте размерность коэффициента теплопроводности.

3.6. *Определение характера течения воздуха через капиллярную трубку*

3.6.1. По формуле (12) найдите среднюю по сечению скорость движения $\langle v \rangle$ воздуха через капиллярную трубку. Сравните её со средней скоростью теплового движения молекул $\langle u \rangle$.

3.6.2. По формуле (13) рассчитайте число Рейнольдса и сделайте вывод о характере течения воздуха через капиллярную трубку.

3.7. *Сделайте вывод.*

4. *Вопросы для самоподготовки*

4.1. Перечислите явления переноса. При каких условиях они возникают?

4.2. Запишите уравнения диффузии, внутреннего трения и теплопроводности. Что переносится в каждом из указанных явлений?

4.3. Каков физический смысл коэффициентов диффузии, внутреннего трения и теплопроводности?

4.4. Какова причина возникновения внутреннего трения? В чём отличие механизма возникновения силы внутреннего трения в газах и жидкостях?

4.5. От каких параметров зависит коэффициент внутреннего трения? Каков характер зависимости коэффициента внутреннего трения жидкости от температуры?

4.6. Какое течение жидкости называют ламинарным? Турбулентным?

4.7. Назовите критерий определения характера течения жидкости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Определение коэффициента Пуассона для воздуха и расчет изменения энтропии при его изохорном нагревании

1. Цель работы: экспериментальное определение коэффициента Пуассона для воздуха и расчёт изменения энтропии при изохорном процессе.

2. Подготовка к работе: изучить в учебниках [1] 8.1–8.3, 9.1–9.6; [2] §§ 50–57 и [3] §§ 65–71 и методические указания к данной лабораторной работе. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) первое начало термодинамики и применение его к различным процессам в газах; б) понятие теплоёмкости, удельной и молярной теплоёмкости, связь между ними, а также теплоёмкость при различных процессах в газах; в) уравнение адиабаты в различных координатах (p – V , V – T , T – S); г) коэффициент Пуассона; д) ответить на вопросы для самоподготовки.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Установка для определения коэффициента Пуассона γ изображена на рис. 1, а на рис. 2 изображена ее схема. В модуле I (см. рис. 1) находится компрессор, соединенный трубкой 3 с баллоном, находящимся в модуле II.

Для накачивания воздуха в баллон нужно включить тумблер «СЕТЬ» и, включив тумблер «КОМПРЕССОР», нажать на клапан «НАПУСК». Клапан 2 (рис. 2) позволяет соединить баллон A с атмосферой и манометром 4. По U -образному манометру, расположенному в модуле II, определяют дополнительное к атмосферному давление в баллоне по разности уровней жидкости в коленах манометра: $\Delta p = \rho gh$, где h – разность уровней жидкости в коленах манометра; ρ – плотность жидкости, $\rho = 10^3$ кг/м³.

3.2. Методика измерений и расчёта

3.2.1. Метод Клемана – Дезорма

Метод Клемана – Дезорма состоит в следующем.

В баллон A (рис. 2) с помощью компрессора накачивается воздух в количестве, соответствующем разности уровней в манометре.

метре, примерно, в 200–300 мм. Температура воздуха в сосуде в результате сжатия несколько повышается (T_1). После прекращения накачивания она будет понижаться до комнатной температуры T_0 . Процесс понижения температуры происходит при постоянном объёме, сопровождаясь понижением давления и, следовательно, понижением разности уровней жидкости в манометре.

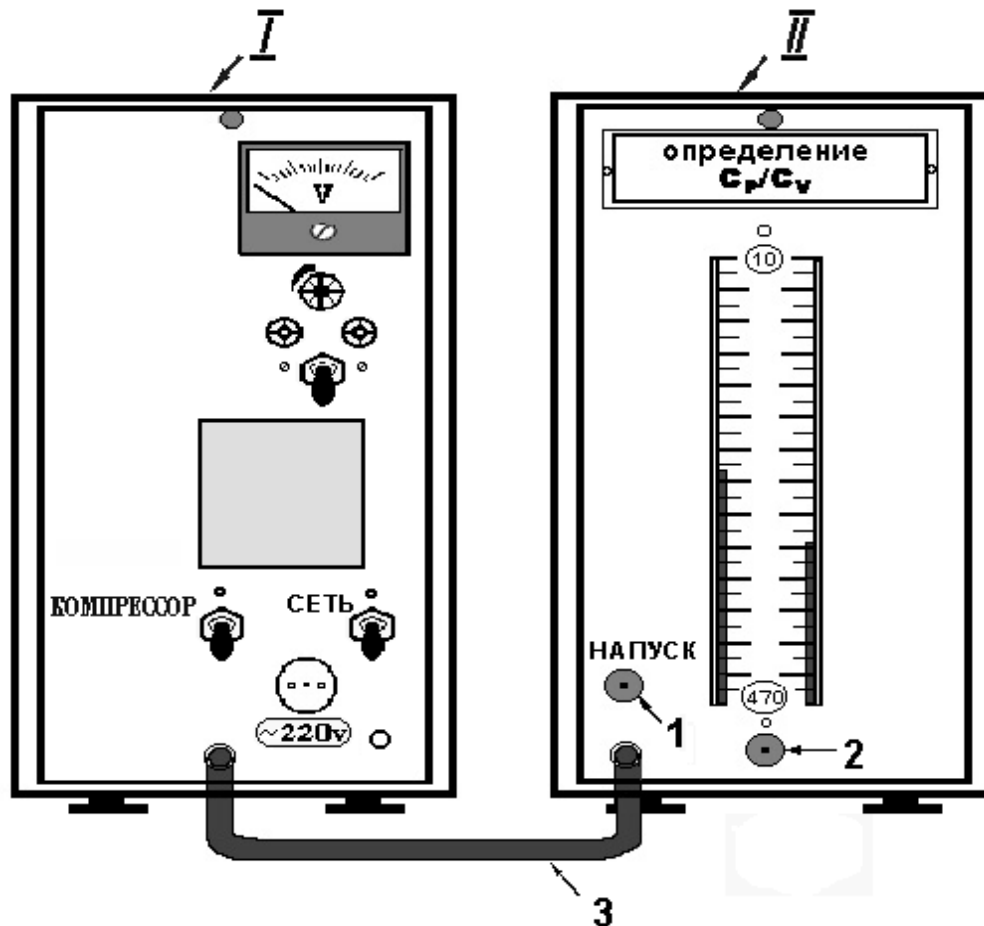


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки для определения коэффициента Пуассона:

1 – клапан, соединяющий компрессор с баллоном; 2 – клапан, соединяющий баллон с атмосферой; 3 – шланг, соединяющий компрессор с баллоном; 4 – манометр

После установления температурного равновесия воздух в баллоне будет характеризоваться параметрами p_1 и T_0 , причём $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, где p_0 – атмосферное давление; h_1 – установившаяся разность уровней жидкости в манометре; $\rho g h_1$ – гидростатическое давление столба жидкости в манометре высотой h_1 ,

которое уравнивает добавочное давление в баллоне; T_0 – комнатная температура. Затем, открыв клапан 2, соединяют баллон с атмосферой, после чего закрывают клапан 2.

В результате этой операции происходит адиабатическое расширение газа и температура воздуха в баллоне понижается до некоторого значения T , а давление становится равным атмосферному p_0 . Поскольку температура $T < T_0$, то воздух в баллоне после закрытия клапана начнет изохорически нагреваться за счёт получения тепла от окружающей среды, следовательно, повысится и разность уровней в манометре. Когда температура станет равной T_0 , изменение уровней в манометре прекратится, и состояние газа будет характеризоваться параметрами $p_2 = p_0 + \rho g h_2$ и T_0 , где h_2 – новая установившаяся разность уровней в манометре.

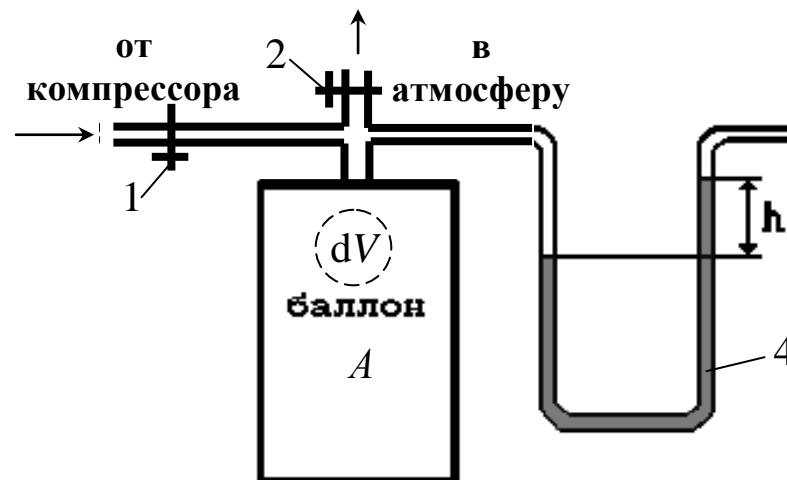


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
A – баллон; 1 – клапан напуска воздуха в баллон;
 2 – клапан, позволяющий соединить баллон с атмосферой и манометром; 4 – манометр

График зависимости давления от температуры после изохорного охлаждения представлен на рис. 3.

Переход газа из состояния 1 в состояние 2 совершается адиабатно ($\delta Q = 0$). Уравнение адиабаты $pV^\gamma = \text{const}$.

Полный дифференциал этого уравнения равен

$$V dp + \gamma p dV = 0. \quad (1)$$

С учётом того, что V_2 и V_1 достаточно близкие значения, можно принять в уравнении (1) $dV = V_2 - V_1$, а также $dp = p_0 - p_1$. Тогда

$$\gamma p (V_2 - V_1) + V(p_0 - p_1) = 0. \quad (2)$$

В состояниях 1 и 3 температура газа одинакова, поэтому в этих состояниях будет одинаковым произведение $pV = \text{const}$ и $d(pV) = 0$. Откуда $p dV + V dp = 0$, или

$$p (V_2 - V_1) + V(p_2 - p_1) = 0. \quad (3)$$

Решая совместно (2) и (3), найдём: $\gamma = (p_1 - p_0)/(p_1 - p_2)$. Замена $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, $p_2 = p_0 + \rho g h_2$ приводит к выражению

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

где h_1 – первоначальная установившаяся разность уровней жидкости в манометре; h_2 – новая установившаяся разность уровней жидкости в манометре.

3.3. Проведение экспериментальных измерений

3.3.1. Включите на модуле I тумблеры «СЕТЬ» и «КОМПРЕССОР», на модуле II нажмите клапан «НАПУСК», соединяющий компрессор с баллоном, добейтесь, чтобы разность уровней в U-образном манометре составила 250–300 мм.

3.3.2. Закройте клапан «НАПУСК», выждите 2–4 минуты, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре воздуха в комнате (уровни в манометре перестанут перемещаться). По нижним уровням менисков определите уровни жидкости в коленах манометра и разность уровней жидкости h_1 .

3.3.3. Резко нажмите клапан 2 на модуле II и отпустите его сразу, как только в первый раз выровняются уровни жидкости в коленах манометра (возможны колебания).

3.3.4. Выждите 2–4 мин, в течение которых температура воздуха в баллоне поднимется до комнатной (уровни жидкости в коленах манометра перестанут перемещаться). Определите разность уровней в коленах манометра h_2 .

Вычислите $\gamma_3 = h_1 / (h_1 - h_2)$.

3.3.5. Повторите опыт 5 раз, результаты занесите в таблицу.

3.3.6. Вычислите теоретическое значение

$$\gamma_T = \frac{i + 2}{i}.$$

Число степеней свободы молекул воздуха $i = 5$.

3.3.7. Найдите расхождение экспериментального и теоретического значений коэффициента Пуассона $\xi = \frac{|\gamma_T - \gamma_{\text{э}}|}{\gamma_T} \cdot 100\%$.

3.3.8. Рассчитайте изменение энтропии ΔS_V при изохорном нагревании воздуха по формуле

$$\Delta S_V \approx \frac{i}{2} \frac{(P_0 + \rho g \langle h_2 \rangle) \cdot V}{T_K} \cdot \frac{\rho g \langle h_2 \rangle}{P_0}.$$

Предварительно определите:

- атмосферное давление $P_0 =$;
- комнатную температуру $T_K =$;
- плотность жидкости в манометре $\rho =$;
- объем баллона $V =$;
- среднюю разность уровней в коленях манометра $\langle h_2 \rangle =$.

Таблица

Результаты экспериментального определения
коэффициента Пуассона

№ п/п	h_1	h_2	$\gamma_{\text{э}} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$	$\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$	γ_T	ξ_{γ}
	мм	мм				%
1						
2						
3						
4						
5						

3.4. Сделайте вывод.

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Какими параметрами характеризуется состояние термодинамической системы?

4.2. Как формулируется первый закон термодинамики? Как записывается этот закон для различных термодинамических процессов?

- 4.3. Как рассчитать удельные теплоемкости c_p и c_v для идеального газа?
- 4.4. Как на практике реализовать адиабатный процесс?
- 4.5. Как записываются уравнения адиабатного процесса? Что характеризует показатель адиабаты?
- 4.6. В чем состоит экспериментальный метод Клемана – Дезорма?
- 4.7. Почему коэффициент Пуассона больше единицы? Может ли он быть равным единице?
- 4.8. Какие процессы протекают с воздухом в данной работе? Как изменяются параметры воздуха при этом?
- 4.9. Как определяется элементарное изменение энтропии при обратимом равновесном процессе?
- 4.10. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? Незамкнутой?
- 4.11. Как изменяется (убывает или возрастает) энтропия при различных обратимых процессах?
- 4.12. Как рассчитать изменение энтропии в четырех изопроцессах в газах?
- 4.13. Как изображаются в координатах p – V и T – S четыре изопроцесса в газах?
- 4.14. Какова связь энтропии S с термодинамической вероятностью w ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Изучение электрического поля коаксиальных цилиндров

1. Цель работы: освоить экспериментальный метод определения характеристик электрических полей и их графического изображения с помощью эквипотенциальных и силовых линий.

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [2] §§ 79–82, 84–86; [4] §§ 4–9; б) ответить на вопросы для самоподготовки.

Для выполнения работы студент должен *знать*: а) определение напряженности и потенциала электростатического поля; б) принцип суперпозиции электростатических полей; в) теорему

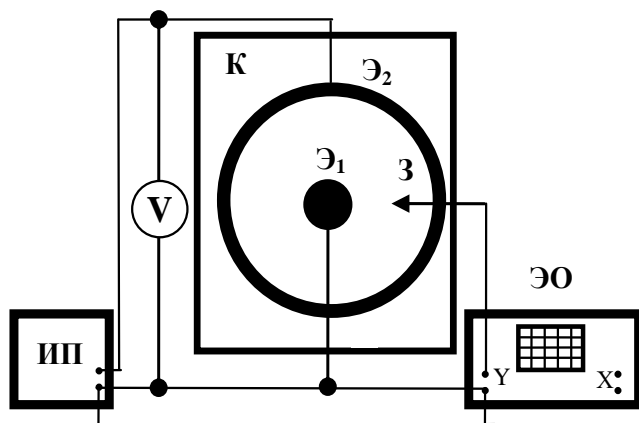


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Гаусса и её применение для расчёта напряжённости электростатического поля, созданного заряженным цилиндром (нитью); г) связь между вектором напряжённости и градиентом потенциала. Уметь: а) строить эквипотенциальные поверхности и линии напряжённости; б) пользоваться измерительными приборами;

в) определять цену деления измерительных приборов.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой измерительную кювету К, выполненную из оргстекла, в которую помещают металлические электроды Э₁ и Э₂. Напряжение подаётся от источника переменного тока ИП, его величина определяется вольтметром V.

Для изучения распределения потенциалов в электростатическом поле используется метод зондов. Для этого в исследуемую точку поля, создаваемого заряженными проводниками (электродами), вводят дополнительный электрод (зонд З), соединённый с электронным осциллографом ЭО. Помещая зонд в точки с определёнными координатами, с помощью электронного осциллографа определяют потенциал этих точек относительно одного из электродов (на рис. 1 относительно электрода Э₁).

На практике модель электростатического поля заменяют более удобной моделью электрического поля постоянного тока в проводящей среде между электродами. Для создания такой модели пространство между электродами заполняют слабо проводящей жидкостью.

Поле постоянного тока в среде имеет практически такую же конфигурацию, что и электростатическое поле в непроводящей среде: оба поля потенциальны, а их линии напряжённости пер-

пендикулярны поверхностям заряженных проводников. В данной работе на электроды подается переменное напряжение промышленной частоты (50 Гц), знак заряда на них изменяется со временем, и ток не является стационарным. Однако, если длина электромагнитной волны в электролите велика по сравнению с линейными размерами самой кюветы, то можно считать условие стационарности тока выполненным. Тогда потенциалы во всех точках исследуемого поля изменяются синхронно, и эквипотенциальные поверхности остаются неизменными.

3.2. Электрическое поле коаксиальных цилиндров

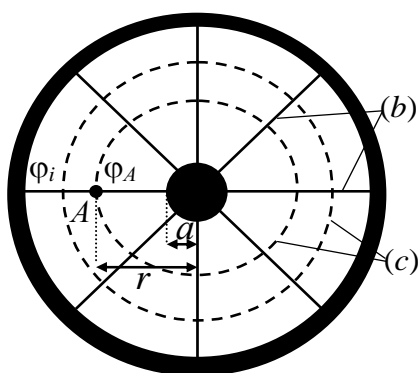


Рис. 2. Силовые (b) и эквипотенциальные (c) линии электрического поля заряженных цилиндров

центра цилиндра до исследуемой точки A поля; ϵ_0 – электрическая постоянная.

Учитывая связь проекции E_r вектора напряжённости и разности потенциалов $d\varphi$ двух точек поля, находящихся на расстоянии dr , получим:

$$E_r = -\frac{d\varphi}{dr} \quad \text{и} \quad \int_0^{\varphi(r)} d\varphi = -\int_a^r E_r dr = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_a^r \frac{dr}{r}.$$

Так как рассматриваемый заряженный цилиндр – металлический, то все его точки внутри и на поверхности имеют один и тот же потенциал $\varphi_0 = 0$. Следовательно, потенциал $\varphi(r)$ на расстоянии r от оси:

В работе исследуется электрическое поле заряженных коаксиальных (соосных) цилиндров, имеющее осевую симметрию (рис. 2). Согласно теореме Гаусса напряженность E поля в области между коаксиальными цилиндрами определяется только зарядом цилиндра радиуса a :

$$E = \frac{\tau}{2\pi r \epsilon_0},$$

где τ – линейная плотность заряда цилиндра (нити); r – расстояние от

$$\varphi(r) = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a}.$$

Из полученного соотношения следует, что эквипотенциальные поверхности поля цилиндра (двух коаксиальных цилиндров) – цилиндрические поверхности, соосные с металлическим цилиндром. Цилиндрические поверхности на плоскости изображаются эквипотенциальными (c) линиями (рис. 2).

3.3. Методика измерений и расчёта

3.3.1. Измерьте штангенциркулем диаметр малого цилиндра и внутренний диаметр большого цилиндра. Рассчитайте радиус a малого и внутренний радиус R большого цилиндра. Результаты занесите в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчётов параметров установки

Радиус малого цилиндра a , м	Внутренний радиус большого цилиндра R , м	Напряжение U , В	Цена деления осциллографа Z , В/дел

3.3.2. Подготовьте лист миллиметровой бумаги: поместите цилиндр (\mathcal{E}_1) малого радиуса в центр координатной сетки, второй цилиндр (\mathcal{E}_2) установите соосно с первым, отметьте на листе положение электродов и координатных осей.

3.3.3. Соберите электрическую схему (изображена на установке).

3.3.4. Положите на дно кюветы подготовленный лист миллиметровой бумаги, смочите его водой и разместите на нём цилиндры.

3.3.5. Подайте напряжение на электроды, измерьте падение напряжения U между электродом \mathcal{E}_1 и точкой вблизи внутренней поверхности электрода \mathcal{E}_2 . Результаты занесите в табл. 1.

3.3.6. Включите осциллограф ЭО и после его прогрева определите цену деления Z шкалы осциллографа. Для этого выключите развёртку осциллографа, зонд Z поставьте на электрод \mathcal{E}_2 и, выбирая усиление осциллографа по Y , установите максимальный размах сигнала по вертикали. Зная величину поданного на

электроды напряжения U , определите цену деления шкалы осциллографа при выбранном режиме работы прибора по формуле (1.4).

3.3.7. Поместите зонд в точку, находящуюся на минимальном расстоянии от малого электрода (рис. 2). Запишите показания k_i электронного осциллографа в делениях шкалы и расстояние r_i в табл. 2. Отметьте на рисунке точку с найденным значением потенциала φ_i .

Таблица 2

Результаты расчёта характеристик электрического поля двух коаксиальных цилиндров

№ п/п	a , м	k_i , дел	r_i , м	φ_i , В	$\ln(r_i/a)$
1					
2					
3					
...					

3.3.8. С помощью зонда найдите положение еще 8–10 точек с тем же значением потенциала φ_i . Отметьте их положение на миллиметровой бумаге.

3.3.9. Изменяя положение зонда (например, по оси X), повторите измерения для других расстояний. Занесите соответствующие данные в табл. 2.

3.3.10. Выключите установку, разберите электрическую схему, уберите из кюветы цилиндры и миллиметровую бумагу.

3.3.11. После высыхания бумаги соедините линиями на рисунке точки с одинаковым значением потенциала φ_i (эквипотенциальные линии) и проведите линии напряжённости E электрического поля, перпендикулярные к эквипотенциальным линиям.

3.3.12. Используя соотношение $\varphi_i = Z k_i$, рассчитайте значения потенциалов φ_i точек исследуемого поля и натуральный логарифм отношения (r_i/a) . Результаты расчётов занесите в табл. 2. Постройте график зависимости $\varphi(r) = f(\ln(r/a))$.

3.3.13. Рассчитайте напряжённость поля в исследуемых точках, используя метод численного дифференцирования. Для каж-

дой последовательной пары точек, начиная с точки на поверхности малого цилиндра, рассчитайте расстояние $\Delta r = r_{i+1} - r_i$ между соседними точками и разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i+1}$ соседних точек поля. Определите среднее значение $\langle E \rangle$ напряжённости точек электрического поля, используя соотношение:

$$\langle E \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}.$$

Это значение напряжённости следует отнести к середине $\langle r \rangle$ выбранного интервала

$$\langle r \rangle = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}.$$

Результаты занесите в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчёта напряжённости электрического поля между электродами методом численного дифференцирования

r_i , м	r_{i+1} , м	Δr , м	φ_i , В	φ_{i+1} , В	$\Delta\varphi$, В	$\langle E \rangle$, В/м	$\langle r \rangle$, м
...							

3.3.14. Постройте график зависимости $\langle E \rangle = f(\langle r \rangle)$.

3.4. *Сделайте вывод.*

К отчёту приложите рисунок эквипотенциальных линий с указанием значения потенциала φ_i и линий напряжённости исследуемого электрического поля, проведённых с учётом их ортогональности к эквипотенциальным линиям.

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Как определяется цена деления многопредельного электроизмерительного прибора?

4.2. Что называют напряжённостью электрического поля? Как направлен вектор напряжённости \vec{E} ?

4.3. Чему равен модуль вектора напряжённости поля точечного заряда на расстоянии r от него? Как направлены вектора напряжённости электрического поля?

4.4. В чём заключается принцип суперпозиции электростатических полей для совокупности электрических зарядов?

4.5. Чему равна работа перемещения электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории? По незамкнутой?

4.6. Что называют потенциалом данной точки электростатического поля? Что называют эквипотенциальной поверхностью?

4.7. Как графически изобразить электростатическое поле? Каково взаимное расположение силовых и эквипотенциальных линий?

4.8. Как связаны напряжённость и потенциал? Как направлен вектор градиента потенциала?

4.9. Что называют потоком вектора \vec{E} ? Как изменится поток вектора \vec{E} , если замкнутую поверхность в виде сферы заменить замкнутой поверхностью произвольной формы?

4.10. Как формулируется теорема Гаусса?

4.11. Чему равен поток вектора \vec{E} сквозь замкнутую поверхность, не содержащую электрических зарядов?

4.12. Что можно сказать о потенциале внутри и на поверхности металлического цилиндра, о напряжённости поля внутри и на поверхности металлического цилиндра?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Определение диэлектрической проницаемости неполярного диэлектрика и поляризуемости его молекул

1. Цель работы: освоение метода определения ёмкости конденсатора с помощью моста Сотти, определение относительной диэлектрической проницаемости и поляризуемости молекул жидкого неполярного диэлектрика.

2. Подготовка к работе: изучить теоретические положения, касающиеся данного метода по литературным источникам [1] 15.1, 15.2; [2] §§ 87–89; [4] §§ 12–14. Для выполнения работы студент должен знать: а) типы диэлектриков и их поляризуемость в электрических полях; б) методику измерений ёмкости конденсатора с помощью моста Сотти; в) алгоритм расчёта диэлектри-

ческой проницаемости диэлектриков и поляризуемости молекул; г) ответы на вопросы для самоподготовки; д) методику и оценку погрешности измерений; е) порядок безопасной работы с электрическими приборами.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

Принципиальная электрическая схема установки изображена на рис. 1, а схема подключения электронного осциллографа

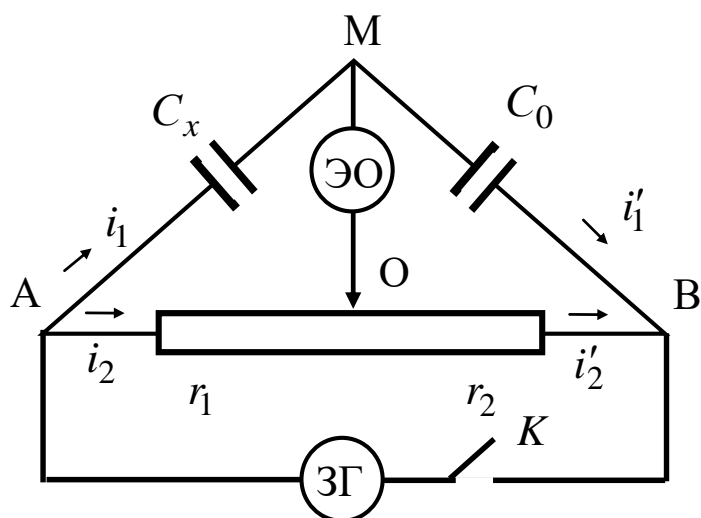


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки

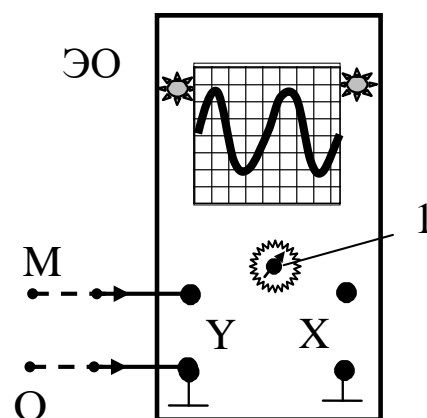


Рис. 2. Схема подключения электронного осциллографа:
1 – ручка развертки

ЭО – на рис. 2. В установке в качестве источника переменного напряжения применяется звуковой генератор ЗГ. Измерения производят на частоте $\nu = 1200$ Гц; C_0 – эталонная ёмкость, величина которой указана на стенде; C_x – ёмкость батареи конденсаторов, которую надо определить. При включенном звуковом генераторе и развёртке осциллографа ЭО на его экране будет видна синусоида, если потенциалы точек М и О не равны между собой. Перемещая движок реостата, можно найти такое его положение, при котором потенциалы этих точек будут равными. На экране осциллографа амплитуда синусоиды при этом будет уменьшаться и при равенстве потенциалов синусоида превращается в прямую.

В установке используется конденсатор переменной ёмкости (ёмкость изменяется путём изменения площади S взаимного перекрытия пластин). На стенде приведена графическая зависимость S от угла поворота φ подвижных пластин. Измерив, угол поворота φ ротора по транспортиру, с помощью графика определяем площадь перекрытия пластин S .

3.2. Методика измерений и расчёта

Электроёмкость плоского конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

где C – электроёмкость; ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заключённой между пластинами конденсатора; S – площадь пластин конденсатора; d – расстояние между пластинами конденсатора.

По известным d и S и экспериментально измеренной электроёмкости конденсатора C можно рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость среды ε . В данной работе применяется батарея параллельно соединённых плоских конденсаторов, погруженных в исследуемую жидкость, являющуюся неполярным диэлектриком. Ёмкость батареи при параллельном соединении конденсаторов равна

$$C_x = C_1 + C_2 + \dots + C_m = mC, \quad (2)$$

где m – число параллельно соединённых одинаковых конденсаторов, а C их электроёмкость.

С учётом (1) и (2) получим

$$C_x = mC = \frac{m\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (3)$$

Из выражения (3) получим

$$\varepsilon = \frac{C_x d}{m\varepsilon_0 S}. \quad (4)$$

При равновесии моста мгновенные значения потенциалов точек $\varphi_M = \varphi_O$, следовательно, также будут равны и мгновенные значения разности потенциалов:

$$\varphi_A - \varphi_M = \varphi_A - \varphi_O, \quad \varphi_M - \varphi_B = \varphi_O - \varphi_B. \quad (5)$$

Будут также равны токи i_1 и i_2 (амплитудные или действующие значения):

$$i_1 = i'_1 ; \quad i_2 = i'_2 . \quad (6)$$

Сопrotивления участков АО и ОВ являются активными и равны r_1 и r_2 , соответственно. Сопrotивления участков АМ и МВ – реактивно-ёмкостные и величины их будут равны

$$X_C^{AM} = \frac{1}{\omega C_x} ; \quad X_C^{MB} = \frac{1}{\omega C_0} , \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота.

Равенства (6) можно записать с помощью закона Ома полагая, что токи квазистационарны. Тогда будем иметь:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_M}{X_C^{AM}} = \frac{\varphi_M - \varphi_B}{X_C^{MB}} ; \quad (8)$$

$$\frac{\varphi_A - \varphi_O}{r_1} = \frac{\varphi_O - \varphi_B}{r_2} . \quad (9)$$

Разделив почленно (8) на (9), получим:

$$\frac{r_1}{X_C^{AM}} = \frac{r_2}{X_C^{MB}} . \quad (10)$$

Подставляя в (10) значения реактивных сопротивлений из (7) и учитывая, что сопротивление плеч реостата пропорционально их длине, получим

$$C_x = C_0 \frac{\ell_{OB}}{\ell_{AO}} . \quad (11)$$

Зная ёмкость эталонного конденсатора и измерив длину плеч реостата от точки А до бегунка (точка О) – ℓ_{AO} и от бегунка до точки В – ℓ_{OB} , по формуле (11) рассчитаем ёмкость неизвестного конденсатора.

Электрическое поле внутри диэлектрика характеризуется вектором электрического смещения \vec{D} и выражается следующим образом:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} , \quad (12)$$

где \vec{P} – дипольный момент единицы объёма диэлектрика или другими словами величина, характеризующая поляризацию диэлектрика.

Для неполярного диэлектрика

$$\vec{P} = \alpha n_0 \varepsilon_0 \vec{E}_{\text{лок}}, \quad (13)$$

где n_0 – концентрация молекул диэлектрика; $\alpha = 4\pi r^3$ – множитель, пропорциональный третьей степени радиуса молекулы и называемый *поляризуемостью молекулы*; $\vec{E}_{\text{лок}}$ – напряжённость локального поля, которое создается свободными зарядами вне диэлектрика и зарядами всех молекул внутри диэлектрика за исключением зарядов рассматриваемой молекулы, то есть

$$\vec{E}_{\text{лок}} = \vec{E} + \frac{1}{3\varepsilon_0} \vec{P}, \quad (14)$$

где \vec{E} – среднее макроскопическое поле в диэлектрике.

С учётом (13) и (14) выражение (12) принимает вид:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \frac{3\alpha n_0 \varepsilon_0}{3 - n_0 \alpha} \vec{E} = \frac{3 + 2\alpha n_0}{3 - n_0 \alpha} \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (15)$$

Из этого выражения следует формула для относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика:

$$\varepsilon = \frac{3 + 2n_0 \alpha}{3 - n_0 \alpha}. \quad (16)$$

Концентрацию молекул можно найти по известной формуле

$$n_0 = \frac{\rho N_A}{M}, \quad (17)$$

где ρ , M – плотность жидкости и её молярная масса, соответственно; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ – постоянная Авогадро.

Тогда поляризуемость молекул диэлектрика будет равна

$$\alpha = \frac{3\varepsilon - 3}{2n_0 + n_0 \varepsilon}. \quad (18)$$

3.3. Подготовка лабораторного стенда к работе

3.3.1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 1).

3.3.2. Поставьте пластины батареи конденсаторов в положение максимального перекрытия, движок реостата – в среднее положение, включите звуковой генератор и осциллограф. Через 2–3 минуты на экране осциллографа появится синусоида, параметры которой можно изменять частотой развёртки и усилением.

3.4. Определение неизвестной ёмкости

3.4.1. Изменяя положение движка реостата O , добейтесь, чтобы на экране осциллографа получилась прямая линия при максимальном усилении осциллографа по вертикали (по Y).

3.4.2. Запишите значения l_{AO} и l_{OB} в табл. 3.1. Зная C_0 , по формуле (11) вычислить C_x . Пользуясь паспортными данными, прилагаемыми к работе, по формуле (4) найдите ε . Результаты занесите в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений ёмкости батареи конденсаторов и расчёта диэлектрической проницаемости ε диэлектрика

№ п/п	φ	S	l_{AO}	l_{OB}	C_0	C_x	ε	$\langle \varepsilon \rangle$
	град	m^2	мм	мм	Ф	Ф		
1								
...								
7								

3.4.3. Проведите аналогичные измерения ещё для $5 \div 7$ различных значений площади взаимного перекрытия пластин батареи конденсаторов (площадь S перекрытия пластин конденсаторов найдите по значениям угла φ с помощью графика зависимости S от φ , прилагаемого к установке). Найдите среднее значение $\langle \varepsilon \rangle$. Результаты занесите в табл. 1.

3.5. Расчёт параметров молекул

3.5.1. Зная молярную массу M и плотность ρ диэлектрика, определите концентрацию молекул диэлектрика n_0 по формуле (17). По формуле (18), пользуясь средним значением $\langle \varepsilon \rangle$, вычислите поляризуемость α молекул диэлектрика. Результаты занесите в табл. 2.

3.5.2. Зная, что $\alpha = 4\pi r^3$, оцените радиус молекулы r .

3.5.3. Оцените погрешность измерений электроёмкости, расчёта относительной диэлектрической проницаемости, поляризуемости.

3.7. Сделайте выводы.

Таблица 2

Результаты расчёта поляризуемости α молекул и оценка радиуса r молекулы диэлектрика

N_A	ρ	M	$\langle \epsilon \rangle$	n_0	α	r
1/моль	кг/м ³	кг/моль		1/м ³	м ³	м
		0,320				

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что называется диполем? Дипольным моментом? Как он направлен?

4.2. Какие диэлектрики называются полярными? В чём состоит их поляризация?

4.3. В чём заключается поляризация в неоднородном электрическом поле?

4.4. Что общего и в чём различие в поляризации полярного и неполярного диэлектриков?

4.5. Зависит ли поляризуемость α неполярной молекулы от температуры? Почему?

4.6. Почему поляризацию неполярных диэлектриков называют деформационной? Электронной?

4.7. Влияет ли тепловое движение на ориентацию индуцированных дипольных моментов неполярной молекулы?

4.8. Какая физическая величина служит количественной мерой поляризации диэлектриков? От чего она зависит?

4.9. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости?

4.10. Как определяется напряжённость поля в диэлектрике?

4.11. В чём заключается особенность установки, изображённой в виде схемы на рис. 1?

4.12. Чем отличается среднее макроскопическое поле в диэлектрике от локального поля?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Определение электроёмкости конденсатора методом моста Сотти

1. Цель работы: усвоение мостового метода измерения ёмкости конденсатора и экспериментальная проверка соотношений при параллельном и последовательном соединении конденсаторов.

2. Подготовка к работе: изучить теоретические положения, касающиеся данного метода по литературным источникам [1] §§ 16.1–16.3; [2] §§ 92–95; [4] §§ 18–20. Для выполнения работы студент должен знать: а) понятие электроёмкости проводника и конденсатора и от чего она зависит; б) понятие реактивно-ёмкостного сопротивления; в) формулы для расчёта ёмкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов; г) расчет электроёмкости батареи конденсаторов; д) схему лабораторной установки; е) схему подключения и управления осциллографом и магазином сопротивлений; ж) расчёт погрешностей измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

Существуют несколько методов экспериментального определения ёмкости конденсаторов. В данной работе ёмкость измеряется при помощи мостовой схемы – моста Сотти (рис. 1).

Из четырёх элементов собирается квадрат, в одну диагональ которого включают источник переменного тока, а в другую – электронный осциллограф. Если источник тока включен, то в цепи, в том числе и на участке ЕД, течёт ток, а на экране осциллографа видна синусоида. Подбором сопротивлений R_1 и R_2 можно добиться равновесия моста Сотти, при котором разность потен-

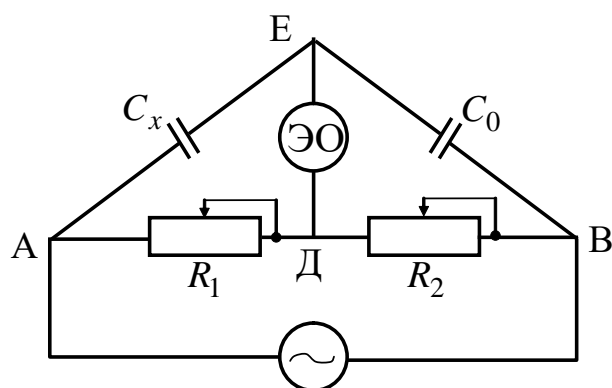


Рис. 1. Схема моста Сотти

циалов ($\varphi_E - \varphi_D$) равна нулю (состояние равновесия моста). По мере приближения к положению равновесия (путем подбора R_2 на магазине сопротивлений) амплитуда синусоиды уменьшается. В момент достижения равновесия синусоида сменяется горизонтальной прямой. Для более точной балансировки моста усиление на Y можно увеличить. После перехода через положение равновесия амплитуда колебаний снова увеличивается.

3.2. Методика измерений и расчёта

При равновесии моста Сотти потенциалы точек E и D равны ($\varphi_E = \varphi_D$). Это значит, что разность потенциалов на участке AE по величине равна разности потенциалов на участке AD :

$$\varphi_A - \varphi_E = \varphi_A - \varphi_D. \quad (1)$$

По аналогичным соображениям:

$$\varphi_E - \varphi_B = \varphi_D - \varphi_B. \quad (2)$$

Токи в ветвях AE и EB , AD и DB будут равны по величине:

$$I_{AE} = I_{EB}; \quad (3)$$

$$I_{AD} = I_{DB}. \quad (4)$$

Сопротивление участка цепи переменного тока, содержащего конденсатор, определяется по формуле $X_c = 1/\omega C$, где C – ёмкость конденсатора; ω – циклическая частота.

К однородным участкам цепи AE , EB , AD и DB применим закон Ома в виде $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$. Тогда равенства (3) и (4) примут вид:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_E}{X_{C_x}} = \frac{\varphi_E - \varphi_B}{X_{C_0}}; \quad (5)$$

$$\frac{\varphi_A - \varphi_D}{R_1} = \frac{\varphi_D - \varphi_B}{R_2}. \quad (6)$$

Разделив почленно равенство (5) на (6), учитывая при этом, что $X_C = \frac{1}{\omega C}$, получим:

$$C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (7)$$

Это и есть рабочая формула для расчёта неизвестной ёмкости. Из рабочей формулы (7) следует, что при измерении целесообразнее фиксировать R_1 и находить равновесие моста при помощи магазина R_2 .

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Соберите цепь по схеме рис. 1.

3.3.2. На магазине сопротивлений выставьте R_1 (от 1500 до 5000 Ом), включите трансформатор и осциллограф, дождитесь появления на экране осциллографа синусоиды.

3.3.3. Меняя сопротивление R_2 на втором магазине, добейтесь, чтобы на экране осциллографа получилась прямая линия. Это возможно при условии равновесия моста.

3.3.4. Запишите значение R_2 в таблицу. Зная C_0 , по формуле (7) вычислите C_x . Результаты занесите в табл.1.

3.3.5. Повторите измерения для другого неизвестного конденсатора, результаты занесите в таблицу.

3.3.6. Измерьте ёмкость при последовательном и параллельном соединении конденсаторов C_{x1} и C_{x2} .

Таблица 1

Результаты измерений ёмкости конденсаторов

Конденсатор	№ опыта	R_1	R_2	C_x	$\langle C_x \rangle$	$\varepsilon, \%$
		Ом	Ом	Ф	Ф	%
C_1	1					
	2					
	3					
C_2	1					
	2					
	3					
$C_{12\text{посл}}$	1					
	2					
	3					
$C_{12\text{пар}}$	1					
	2					
	3					

3.3.7. Сравните их со значениями, полученными путём расчёта по формулам для параллельного и последовательного соединения конденсаторов.

$$\varepsilon = \frac{|C_{\text{экс}} - C_{\text{расч}}|}{C_{\text{экс}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

3.4. *Сделайте выводы.*

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что называется электроёмкостью уединенного проводника? От чего она зависит? В каких единицах измеряется электроёмкость?

4.2. Что представляет собой конденсатор? Как вывести формулы электроёмкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов?

4.3. В чём заключается принцип действия моста Сотти?

4.4. Три одинаковых конденсатора один раз соединены последовательно, другой – параллельно. Во сколько раз и когда электроёмкость батареи будет больше?

4.5. Всегда ли одинаковы электроёмкости двух одинаковых по форме и размерам проводников?

4.6. Что больше электроёмкость Земли ($R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м) или Солнца ($R_C = 6,95 \cdot 10^8$ м)? Какой радиус должен иметь проводящий шар, чтобы в вакууме его ёмкость равнялась 1 Ф?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Измерение сопротивления методом амперметра – вольтметра

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

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] 18.1, 19.1–19.3; [2] §§ 96–101; [4] §§ 24–27; б) ответить на вопросы для самоподготовки.

Для выполнения работы студент должен знать: а) определение электрического тока и его характеристики; б) закон Ома в локальной и интегральной форме записи для однородного и не-

однородного участка электрической цепи; в) физическую сущность сопротивления проводника. Уметь: а) пользоваться электроизмерительными приборами; б) определять цену деления измерительных приборов; в) рассчитывать погрешности при электрических измерениях.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Принципиальные электрические схемы для определения сопротивления методом амперметра-вольтметра, показаны на рис. 1 и 2. Напряжение, подаваемое от источника питания с помощью

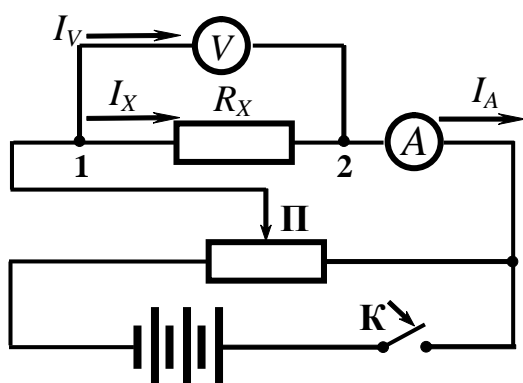


Рис. 1. Электрическая схема для измерения неизвестного сопротивления по схеме (I)

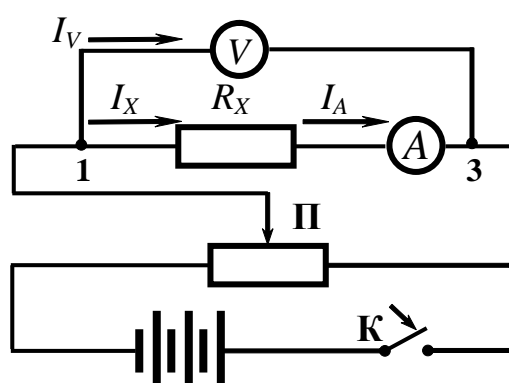


Рис. 2. Электрическая схема для измерения неизвестного сопротивления по схеме (II)

ключа К через потенциометр П на неизвестное сопротивление R_X , определяется вольтметром V, ток регистрируется амперметром А. При подключении вольтметра к точкам 1 и 2 (рис. 1) осуществляется работа по схеме (I). При подключении вольтметра к точкам 1 и 3 (рис. 2) осуществляется работа по схеме (II).

3.2. Методика измерений и расчёта

Сила тока, измеряемого амперметром I_A по схеме (I), равна сумме токов через вольтметр и неизвестное сопротивление:

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

где R_V – сопротивление вольтметра.

Тогда неизвестное сопротивление определится из соотношения:

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

Показание вольтметра U_V в схеме измерения (II) равно сумме напряжений на сопротивлении R_X и на амперметре сопротивлением R_A :

$$U_V = U_X + U_A = U_X + I_A \cdot R_A.$$

Тогда неизвестное сопротивление определится соотношением:

$$R_{X(II)} = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (2)$$

Как видно из формул (1) и (2), при измерении сопротивления методом амперметра – вольтметра по схеме (I) в расчётную формулу входит сопротивление вольтметра R_V , а по схеме (II) – сопротивление амперметра R_A .

Без учета сопротивления измерительных приборов неизвестное сопротивление рассчитывают по упрощённой формуле:

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

В этом случае возникает относительная методическая погрешность измерения ε , равная:

$$\varepsilon = \frac{|R_X - R'_X|}{R_X} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где R_X – истинное значение измеряемого сопротивления, рассчитанное по формуле (1) или (2) в зависимости от используемой схемы измерения.

Относительная методическая погрешность измерения для схемы (I)

$$\varepsilon_{(I)} = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

а для схемы (II)

$$\varepsilon_{(II)} = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Следовательно, относительная методическая погрешность измерения сопротивления зависит от соотношения измеряемого

сопротивления R_X и сопротивлений приборов R_A и R_V . Первую схему (I) измерения можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз меньше сопротивления вольтметра ($R_V \gg R_X$), а вторую схему (II) измерения можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз больше сопротивления амперметра ($R_X \gg R_A$). Следует отметить, что рассмотренный метод не обеспечивает высокой точности, так как погрешность измерения сопротивления этим методом всегда больше суммы *приведённых погрешностей* обоих приборов.

3.3. Определение параметров измерительных приборов

3.3.1. Повернув переключатель на приборах, выберите пределы измерения $X_{пр}$, определите цену деления. Результаты занесите в табл. 1.

3.3.2. Определите класс точности приборов γ (указан на шкале прибора). Рассчитайте абсолютную погрешность приборов. Общая формула для расчета минимальной абсолютной погрешности имеет вид:

$$\Delta X_{\text{приб}} = \frac{\gamma}{100} X_{\text{max}},$$

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

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

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

данные занесите в табл. 1.

Таблица 1

Параметры измерительных приборов

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

3.4. Определение сопротивления R_X по схеме (I)

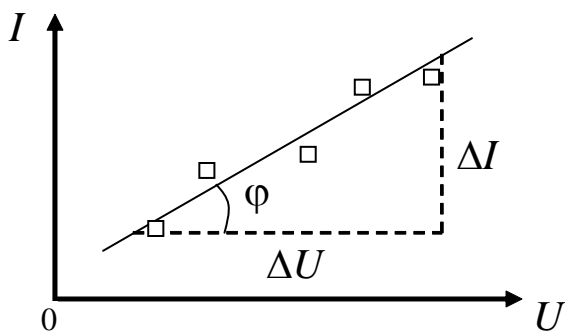
3.4.1. Соберите схему (I), потенциометр П поставьте в положение минимума снимаемого напряжения, замкните ключ К.

3.4.2. Изменяя положение движка потенциометра П, снимите показания приборов для значений напряжения U_V и тока I_A . Результаты занесите в табл. 2.

3.4.3. Используя графический метод (рис. 3), определите неизвестное омическое сопротивление $R'_{X(I)}$ без учёта сопротивления вольтметра. Для этого постройте график зависимости силы тока от напряжения $I_A = f(U_V)$, по которому определите котангенс угла наклона прямой, проведённой через точки графика:

$$R'_{X(I)} = \text{ctg} \varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

3.4.4. По формуле $I_X = I_A - I_V = I_A - \frac{U_V}{R_V}$ рассчитайте ток



через неизвестное сопротивление $R_{X(I)}$. Результаты расчёта занесите в табл. 2.

3.4.5. По графику зависимости $I_X = f(U_V)$ определите $R_{X(I)}$.

3.4.6. Рассчитайте относительную погрешность измерений для различных значений тока и напряжения по формуле

$\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \%$ и методическую погрешность $\varepsilon_{(I)}$ по формуле (5).

Рис. 3. Вольт-амперная характеристика проводника

Таблица 2

Результаты измерения неизвестного сопротивления по схеме (I) и расчёта погрешностей

№	U_V	I_A	I_X	$R'_{X(I)}$	$R_{X(I)}$	ε_V	ε_A	$\varepsilon_{(I)}$
	В	А	А	Ом	Ом	%	%	%
1								
2								
...								
5								

3.5. Определение сопротивления R_X по схеме (II)

3.5.1. Соберите схему (II), потенциометр П поставьте в положение минимума снимаемого напряжения, замкните ключ К.

3.5.2. Повторите п.п. 3.4.2 и 3.4.3 для определения сопротивления $R'_{X(II)}$. Результаты занесите в табл. 3.

3.5.3. По формуле $U_X = U_V - U_A = U_V - I_A R_A$ рассчитайте напряжение на неизвестном сопротивлении.

3.5.4. По полученным данным постройте график зависимости $I_A = f(U_X)$ и рассчитайте неизвестное сопротивление $R_{X(II)}$.

3.5.5. Рассчитайте относительные погрешности ε_V , ε_A отдельных измерений, а также относительную методическую погрешность $\varepsilon_{(II)}$ определения неизвестного сопротивления по формуле (6).

Таблица 3

Результаты измерения неизвестного сопротивления по схеме (II) и расчёта погрешностей

№	U_V	I_A	U_X	$R'_{X(II)}$	$R_{X(II)}$	ε_V	ε_A	$\varepsilon_{(II)}$
	В	А	В	Ом	Ом	%	%	%
1								
2								
3								
4								
5								

3.6. Сделайте вывод.

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Как следует включить реостат (переменное сопротивление) для изменения силы тока в цепи?

4.2. Как включить в цепь реостат в качестве потенциометра, то есть для изменения напряжения?

4.3. Что такое сопротивление? От чего оно зависит? Какие существуют способы определения сопротивления?

4.4. Как записывается закон Ома для пассивного и активного участков электрической цепи в локальной и интегральной формах записи?

4.6. Чем отличаются схемы (I) и (II) для измерения сопротивления?

4.7. Выведите формулу для определения относительной методической погрешности измерения сопротивления по схемам (I) и (II).

4.8. Как найти абсолютную погрешность измерения по классу точности прибора?

4.9. При каких значениях неизвестного сопротивления и сопротивлений приборов можно использовать схемы (I) и (II), если задано, что точность измерений должна быть меньше 3 %; 10 %; 15 %?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Определение удельного сопротивления резистивного провода

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

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] 18.1, 19.1–19.3; [2] §§ 96–101; [4] §§ 24–27; б) ответить на вопросы для самоподготовки.

Для выполнения работы студент должен знать: а) определение электрического тока и его характеристики; б) закон Ома в локальной и интегральной форме записи для однородного и неоднородного участка электрической цепи; в) физическую сущность сопротивления проводника. Уметь: а) пользоваться электроизмерительными приборами; б) определять цену деления измерительных приборов; в) рассчитывать погрешности при электрических измерениях.

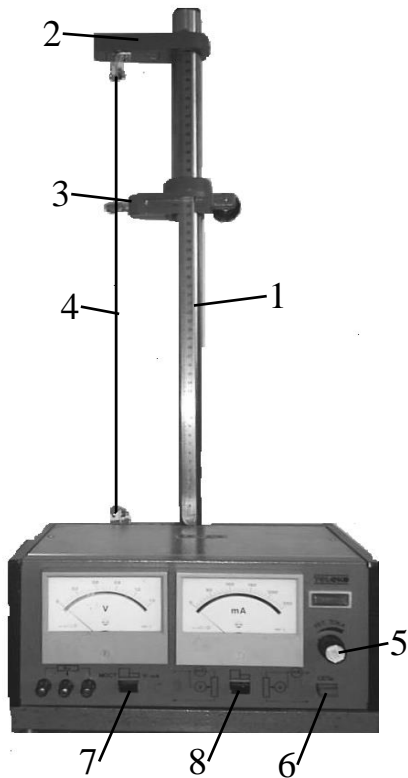


Рис.1. Общий вид установки

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Общий вид установки представлен на рис. 1. Основание оснащено регулируемыми винтами, которые позволяют произвести выравнивание положения прибора. К основанию прикреплена стойка 1 с нанесённой метрической шкалой. На стойке смонтированы неподвижный кронштейн 2 и подвижный – 3, который можно перемещать и фиксировать в любом положении. Между кронштейнами натянут металлический провод 4, который прикреплен к зажимам с помощью винтов. Через контакт на подвижном кронштейне обеспечивается хорошее соединение с проводом. Измерительная часть установки находится в корпусе, укрепленном на основании установки. На панели прибора закреплены вольтметр V и миллиамперметр mA.

Измерительная часть установки находится в корпусе, укрепленном на основании установки. На панели прибора закреплены вольтметр V и миллиамперметр mA.

3.2. Методика измерений и расчёта

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

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

где R_A – сопротивление амперметра.

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

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

В схеме (II) амперметр измеряет ток I_A , равный сумме токов

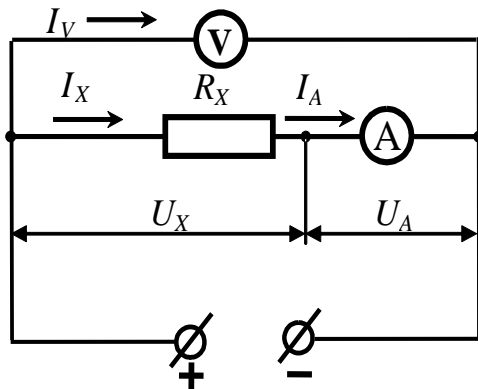


Рис. 2. Электрическая схема для измерения сопротивления по схеме (I)

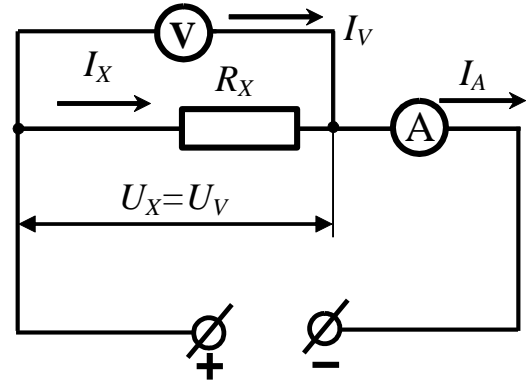


Рис. 3. Электрическая схема для измерения сопротивления по схеме (II)

I_X и I_A , протекающих через сопротивление и вольтметр (рис. 3):

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

где R_V – сопротивление вольтметра.

В этом случае неизвестное сопротивление определяется соотношением:

$$R_{X(II)} = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I_A - I_V} = \frac{U_X}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (2)$$

В расчётные соотношения для определения неизвестного сопротивления (1) и (2) входит либо сопротивление амперметра R_A , либо сопротивление вольтметра R_V .

3.3. Погрешности измерений

Без учёта погрешностей измерительных приборов неизвестное сопротивление рассчитывают по упрощённой формуле:

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

При этом возникает относительная методическая погрешность измерения ε , равная:

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

где R_X – истинное значение измеряемого сопротивления по схемам (I) и (II).

Относительная методическая погрешность измерения сопротивления по указанным схемам определится соотношениями:

$$\varepsilon_{(I)} = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100\% \quad \text{и} \quad \varepsilon_{(II)} = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100\% . \quad (4)$$

Следовательно, схему (I) можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз меньше сопротивления вольтметра ($R_X \ll R_V$), а схему (II), когда измеряемые сопротивления во много раз больше сопротивления амперметра ($R_X \gg R_A$). Однако рассмотренный метод не обеспечивает высокой точности, так как погрешность измерения сопротивления этим методом всегда больше суммы *приведённых погрешностей* обоих приборов.

3.4. Определение параметров измерительных приборов

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

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

Таблица 1

Параметры измерительных приборов

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

3.5. Определение сопротивления провода по схеме (I)

3.5.1. Поставьте подвижный кронштейн 3 так, чтобы рабочая длина провода была не менее 35–45 см.

3.5.2. Подключите прибор к сети переменного напряжения 220 В. Электрическая схема прибора обеспечивает преобразование переменного напряжения сети в постоянное, которое через потенциометр 5 подаётся в измерительную цепь. Поставьте потенциометр в положение минимума снимаемого напряжения.

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

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

Таблица 2

Результаты измерения вольт-амперной зависимости по схеме (I)

№	U_V , В	I_A , А	U_X , В	$R'_{X(I)}$, Ом	$R_{X(I)}$, Ом	ε_V , %	ε_A , %	$\varepsilon_{(I)}$, %
1								
2								
...								
5								

3.5.6. Рассчитайте напряжение U_X на неизвестном сопротивлении $U_X = U_V - U_A = U_V - I_A \cdot R_A$.

Результаты вычислений занесите в табл. 2.

3.5.7. Используя графический метод, определите неизвестное омическое сопротивление $R'_{X(I)}$ без учёта падения напряжения на амперметре. Для этого постройте график $I_A = f(U_V)$ вольт-амперной зависимости силы тока от напряжения (рис. 4), по которому определите котангенс угла $\text{ctg} \varphi$ наклона прямой, проведённой через точки графика:

$$R'_{X(I)} = \text{ctg} \varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

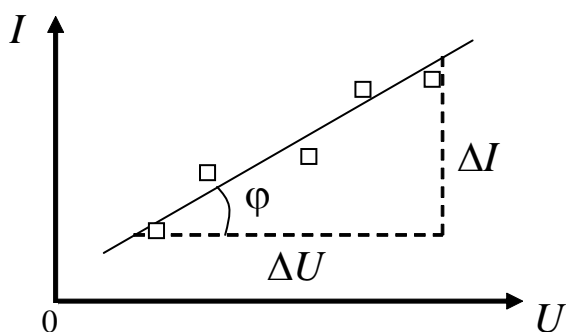


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика проводника

3.5.8. Определите $R'_{X(I)}$

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

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

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

методическую погрешность $\varepsilon_{(I)}$ измерения сопротивления при использовании схемы (I) по формуле (4).

3.6. Определение сопротивления провода по схеме (II)

3.6.1. Поставьте потенциометр в положение минимума снимаемого напряжения, нажмите клавиши 7 и 8.

3.6.2. Изменяя потенциометром напряжение, снимите вольт-амперную зависимость для проводника выбранной длины. Значения U_V и I_A занесите в табл. 3.

3.6.3. Определите графически сопротивление $R'_{X(II)}$ (см. п. 3.5.7).

3.6.4. Рассчитайте силу тока I_X через неизвестное сопротивление по формуле

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

3.6.5. Определите сопротивление $R_{X(II)}$, используя график зависимости $I_X = f(U_V)$.

3.6.6. Рассчитайте относительные погрешности ε_V и ε_A отдельных измерений напряжения и силы тока и относительную методическую погрешность $\varepsilon_{(II)}$ измерения сопротивления при использовании схемы (II) по формуле (4).

Таблица 3

Результаты измерения вольт-амперной зависимости по схеме (II)

№	U_V , В	I_A , А	I_X А	$R'_{X(II)}$, Ом	$R_{X(II)}$, Ом	ε_V , %	ε_A , %	$\varepsilon_{(II)}$, %
1								
2								
...								
5								

3.7. Определение удельного сопротивления провода

3.7.1. Используя схему измерения, которая даёт меньшую погрешность, снимите зависимость тока I_A от максимального напряжения U_V при различных значениях длины провода ℓ . Результаты занесите в табл. 4.

3.7.2. Рассчитайте сопротивление R участков проводника длиной ℓ , используя соотношение

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

Таблица 4

Результаты измерений и расчёта удельного сопротивления провода

	ℓ , м	U_V , В	I_A , А	R , Ом	$\frac{\ell}{S}$, м ⁻¹	ρ , Ом·м
1						
...						
5						

3.7.3. Рассчитайте площадь S поперечного сечения провода диаметром $d = 0,36$ мм и отношение ℓ/S участка длины провода к площади поперечного сечения.

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

3.8. *Сделайте вывод.*

4. *Вопросы для самоподготовки*

Ответьте на вопросы для самоподготовки, предложенные в лабораторной работе № 10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли

1. Цель работы: освоить магнитометрический метод определения горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли.

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [2] §§ 109, 110; [4] §§ 35, 36; б) ответить на вопросы для самоподготовки.

Для выполнения работы студент должен знать: а) характеристику магнитного поля – вектор индукции \vec{B} ; б) характеристики магнитного поля Земли; в) закон Био – Савара – Лапласа и его применение для расчета магнитных полей, созданных проводниками с током; г) устройство и принцип действия тангенс-гальванометра. Уметь: а) пользоваться электроизмерительными приборами; б) определять цену деления измерительных приборов; в) рассчитывать погрешности измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Для определения горизонтальной составляющей вектора \vec{B} индукции магнитного поля Земли используется лабораторная установка, электрическая схема которой приведена на рис. 1. Лабораторная установка содержит тангенс-гальванометр G , амперметр A , реостат R для изменения силы тока в катушке тангенс-гальванометра, ключ K , двойной переключатель Π для изменения направления тока в катушке и источник постоянного тока \mathcal{E} .

Тангенс-гальванометр G состоит из катушки, содержащей N витков тонкой изолированной проволоки, укрепленной на вращающейся подставке. В центре катушки горизонтально укреплен компас, магнитная стрелка которого может свободно вращаться вокруг вертикальной оси. Круговая шкала компаса проградуирована в угловых градусах.

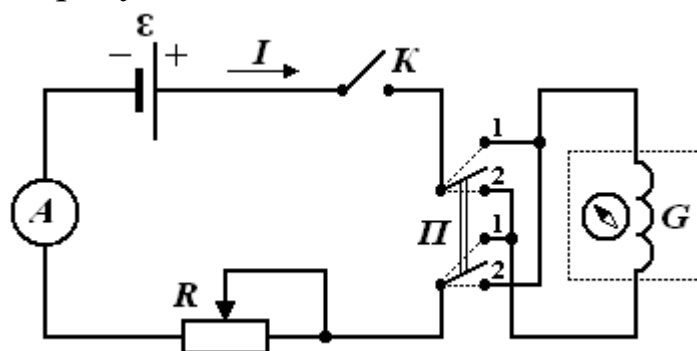


Рис. 1. Электрическая схема установки

3.2. Методика измерений и расчёта

3.2.1. Характеристики магнитного поля Земли

По современным представлениям, магнитное поле Земли представляет собой диполь – двухполюсный магнит. Его центр смещён относительно центра Земли в направлении на 18° север-

ной широты и $147,8^\circ$ восточной долготы. Ось этого диполя наклонена к оси вращения Земли на $11,5^\circ$. Магнитные полюса – точки, в которых сходятся магнитные силовые линии. Ось земного диполя смещена относительно оси вращения Земли, так как магнитные полюса её не совпадают с географическими полюсами (рис. 2, а).

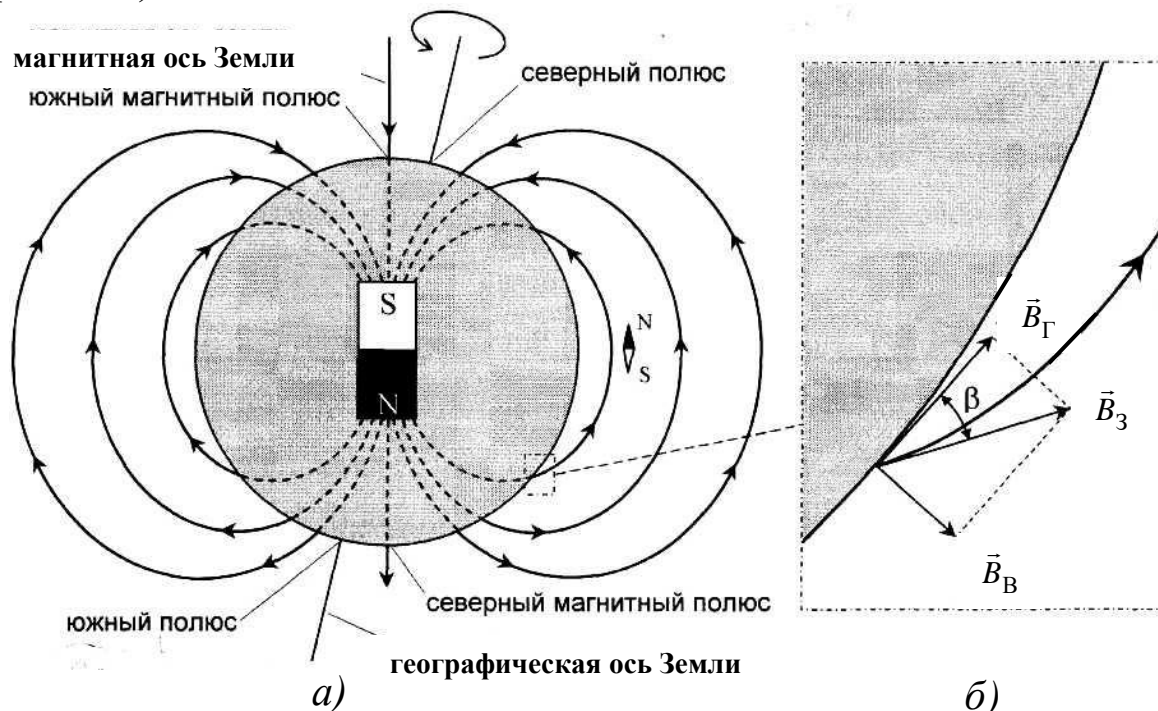


Рис. 2. Изображение магнитного поля Земли с помощью линий индукции

Магнитные полюса не остаются на месте, а перемещаются по сложной траектории вокруг географических полюсов. Так, северный магнитный полюс за сутки перемещается по поверхности Земли на 20,5 м (7,5 км в год), а южный – на 30 м (11 км в год). Например, в настоящее время южный магнитный полюс расположен недалеко от северного географического полюса в точке с координатами $(78,6 + 0,04^\circ T)$ северной широты и $(70,1 + 0,07^\circ T)$ западной долготы, где T – число десятилетий от 1970 года.

Индукция геомагнитного поля испытывает периодические колебания: а) суточные; б) годовые; в) вековые. Изучение остаточной намагниченности пород прошлых времён позволило установить, что имеются и более длительные периоды колебания ин-

дукции геомагнитного поля, во время которых происходит смена полюсов – северный полюс становится южным, и наоборот.

Магнитное поле Земли по своей структуре неоднородно. Оно складывается из двух частей: постоянного и переменного полей. Постоянное поле вызвано внутренними источниками магнетизма, а источниками переменного поля являются электрические токи в верхних слоях атмосферы – ионосфере и магнитосфере. В свою очередь постоянное магнитное поле по своей природе неоднородно и состоит из нескольких частей. Это поля, создаваемые однородной намагниченностью Земли, неоднородностью глубоких слоёв, различной намагниченностью верхних частей земной коры. Внешнее переменное поле по отношению к внутреннему составляет менее 1 % и поэтому им можно пренебречь.

Плоскость, проведённая через магнитную силовую линию и магнитные полюса, называется *плоскостью магнитного меридиана*. Линия пересечения этой плоскостью поверхности Земли называется *магнитным меридианом*. Вектор индукции магнитного поля Земли можно разложить на две составляющие: горизонтальную B_H и вертикальную B_V (рис. 2, б). Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли для данного географического пункта определяют с помощью тангенс-гальванометра.

3.2.3. Расчет индукции магнитного поля в центре кругового тока

Элемент $d\vec{\ell}$ проводника с током I (рис. 3) создаёт магнитное поле, индукция $d\vec{B}$ которого определяется законом Био – Савара – Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{\ell}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды (для воздуха $\mu \approx 1$); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; \vec{r} – радиус-вектор, определяющий положение точки магнитного поля относительно элемента $d\vec{\ell}$ проводника с током I .

Модуль вектора индукции B магнитного поля в центре кругового витка радиусом R с током I определяется соотношением:

$$B = \int_0^B dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} d\ell = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}. \quad (2)$$

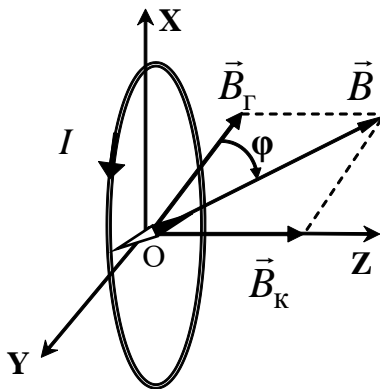


Рис. 4. Круговой виток с током в магнитном поле

С учётом выбранного направления тока в витке (рис. 3) вектор \vec{B} индукции магнитного поля направлен «к нам». Катушка тангенсгальванометра содержит N витков, поэтому индукция в центре катушки определится соотношением:

$$B_K = \frac{\mu_0 IN}{2R}. \quad (3)$$

Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке устанавливается в плоскости магнитного меридиана в направлении горизонтальной составляющей \vec{B}_Γ магнитного поля Земли. Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана.

При включении тока I стрелка компаса повернётся на угол φ (рис. 4) и установится по направлению результирующего вектора \vec{B} . Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, вектор индукции \vec{B} результирующего поля определяется соотношением:

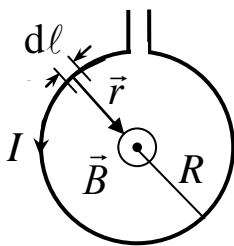


Рис. 3. Круговой виток с током

$$\vec{B} = \vec{B}_\Gamma + \vec{B}_K, \quad (4)$$

где \vec{B}_Γ – определяет горизонтальную составляющую магнитного поля Земли; \vec{B}_K – определяет индукцию магнитного поля катушки с током (индукцией магнитного поля стрелки компаса пренебрегаем).

Определив угол φ (угол β на рис. 2) поворота магнитной стрелки, можно найти горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли:

$$B_{\Gamma} = \frac{B_{\text{к}}}{\text{tg}\varphi} = \frac{\mu_0 IN}{2R\text{tg}\varphi}. \quad (5)$$

3.3. *Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли при расположении катушки в плоскости магнитного меридиана*

3.3.1. Определите цену деления амперметра. Параметры установки занести в табл. 1.

Таблица 1

Параметры установки

Цена деления амперметра	Радиус катушки	Число витков катушки

3.3.2. Соберите цепь по схеме, изображённой на рис. 1.

3.3.3. Совместите плоскость витка с плоскостью магнитного меридиана. По лимбу определите положение северного конца магнитной стрелки (угловая координата φ_0). Результаты занесите в табл. 2.

3.3.4. Замкните цепь тангенс-гальванометра ключом K и перемещением движка реостата R добейтесь отклонения стрелки на угол $\varphi_1 = |\varphi_0 - \varphi'| \approx 40^\circ$, где φ' – новая угловая координата северного конца магнитной стрелки.

3.3.5. С помощью переключателя Π измените направление тока в цепи и измерьте угловую координату φ'' северного конца магнитной стрелки, определите угол $\varphi_2 = |\varphi'' - \varphi_0|$. Разница между углами φ_1 и φ_2 по модулю не должна превышать 2° .

Таблица 2

Результаты измерений углов и расчёта B_{Γ} при расположении катушки в плоскости магнитного меридиана

№	I		φ_0	φ'	φ_1	φ''	φ_2	$\langle\varphi\rangle$	$\text{tg}\langle\varphi\rangle$	B_{Γ}	$\langle B_{\Gamma}\rangle$
	дел	А	град	град	град	град	град	град		Тл	Тл
1											
2											
3											
4											
5											

3.3.6. Проведите измерения для углов φ_1 в интервале от 40° до 50° . Запишите величину силы тока в делениях для каждого угла. Полученные результаты измерений занесите в табл. 2.

3.3.7. Измените направление тока в цепи и измерьте углы φ_2 при использованных значениях силы тока I .

3.3.8. Рассчитайте горизонтальную составляющую B_Γ вектора индукции магнитного поля Земли, используя соотношение (5) и её среднее значение $\langle B_\Gamma \rangle$.

3.3.9. Рассчитайте относительную ε_B и абсолютную ΔB_Γ погрешности горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли

$$\varepsilon_B = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_I^2 + \varepsilon_{\text{tg}\varphi}^2}, \quad \Delta B_\Gamma = \varepsilon_B \langle B_\Gamma \rangle.$$

3.3.10. Сравните полученное экспериментально среднее значение $\langle B_\Gamma \rangle$ со значением этой величины на широте г. Кемерово $B_\Gamma = 1,55 \cdot 10^{-5}$ Тл.

3.4. *Сделайте вывод.*

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что называется магнитным полем? При каких условиях оно возникает?

4.2. Как графически изображается магнитное поле?

4.3. Чем обусловлено магнитное поле Земли? Где располагаются магнитные полюса Земли?

4.4. Какие элементы введены для описания магнитного поля Земли?

4.5. Чему равен и как направлен вблизи г. Кемерово вектор индукции магнитного поля Земли?

4.6. В чём состоит физический смысл закона Био – Савара – Лапласа?

4.7. В чём заключается принцип суперпозиции магнитных полей?

4.8. Как определить направление вектора индукции магнитного поля, создаваемого проводником с током?

4.9. Как определить индукцию магнитного поля в центре кругового витка с током?

4.10. Как определить индукцию магнитного поля прямого тока?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

Определение индуктивности катушки

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

2. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] 24.5, 25.2; [2] §§ 122, 123, 126, 128; [4] §§ 52–55; б) ответить на вопросы для самоподготовки.

Для выполнения работы студент должен знать: а) закон электромагнитной индукции и правило Ленца; б) понятие о магнитном потоке и индуктивности контура; в) метод векторных диаграмм и его применение к расчёту индуктивности катушки; г) понятие магнитной проницаемости среды. Уметь: а) пользоваться электроизмерительными приборами; б) определять цену деления измерительных приборов; в) рассчитывать погрешности при электрических измерениях.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

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

Данная электрическая схема предназначена для снятия вольт-амперной характеристики катушки на постоянном (рис. 1, а) и переменном напряжении (рис. 1, б). Используемые при этом измерительные приборы предназначены для определения как постоянных, так и зависящих от времени значений тока и напряжения. В цепи, содержащей источник переменного напряжения, измеряются эффективные (действующие) значения силы тока I_A и напряжения U .

3.2. Методика измерений и расчёта

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

$$\Psi = LI,$$

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

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

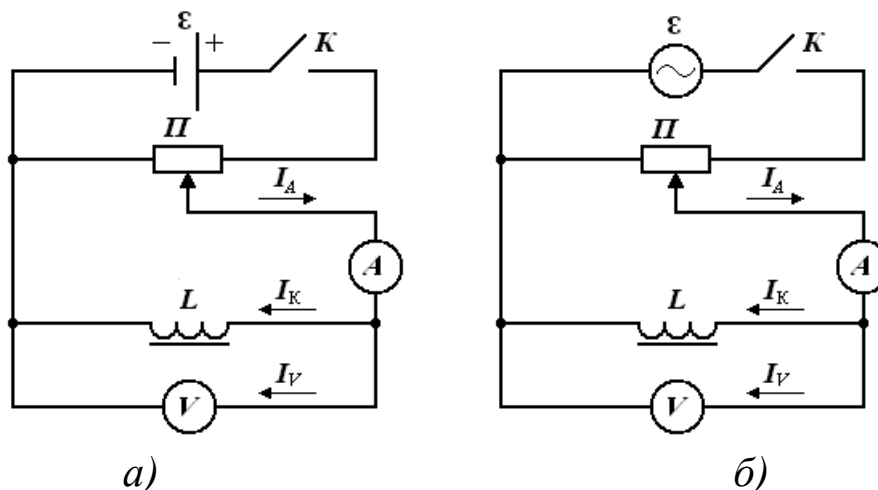


Рис 1. Принципиальная электрическая схема установки с источником постоянного напряжения (а) и переменного напряжения (б)

Изменение силы тока в контуре, содержащем катушку индуктивности, сопровождается возникновением электродвижущей силы самоиндукции:

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt}\right).$$

Для неферромагнитной среды $L = \text{const}$ и $\frac{dL}{dt} = 0$, а при наличии ферромагнетика индуктивность L увеличивается в μ раз, так как магнитная проницаемость μ является переменной величиной и зависит от силы намагничивающего тока и характеристики сердечника.

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

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

где U_m – амплитуда напряжения; ω – циклическая частота.

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

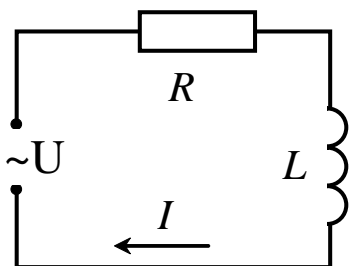


Рис. 2. Участок цепи, содержащий резистор и катушку индуктивности:

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

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

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

$$U_m \cos \omega t - L \frac{dI}{dt} = 0,$$

из этого соотношения следует

$$dI = \frac{U_m}{L} \cos \omega t dt.$$

После интегрирования получим

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

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

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

Амплитуда U_m приложенного напряжения на резисторе U_R и на катушке U_L равна векторной сумме амплитуд этих падений напряжений (рис. 3). Из прямоугольного треугольника получаем соотношение

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

из которого амплитуда силы тока

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

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

Из полученного соотношения выражаем индуктивность катушки

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

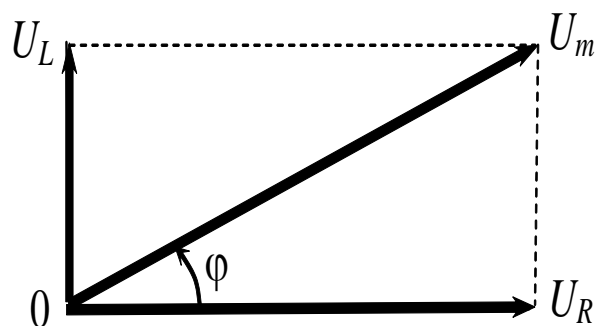


Рис. 3. Векторная диаграмма амплитуд напряжений

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переменного напряжения.

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

3.3. Определение омического сопротивления R катушки

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

3.3.2. После проверки схемы преподавателем поставьте движок реостата в положение минимума снимаемого напряжения.

Замкните ключ K , снимите вольт-амперную зависимость (показания приборов для значений напряжения U и тока I_A). Результаты измерений занесите в табл. 1.

3.3.3. Рассчитайте токи, протекающие через вольтметр I_V

$$I_V = \frac{U}{R_V},$$

где R_V – сопротивление вольтметра R_V (указано на шкале прибора) и катушку I_K :

$$I_K = I_A - I_V.$$

Таблица 1

Результаты измерения омического сопротивления катушки

$$R_V =$$

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

3.3.4. Постройте график вольт-амперной зависимости $I_K = f(U)$, откладывая по оси ординат ток катушки I_K , по оси абсцисс напряжение U . Котангенс угла наклона прямой, проведённой через точки графика, определяет омическое сопротивление R

катушки $R = \text{ctg}\varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I_K}$

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

3.4.1. Соберите электрическую схему 1, б. После проверки схемы преподавателем поставьте движок реостата в положение минимума снимаемого напряжения, замкните ключ K , снимите вольт-амперную зависимость $I_A = f(U)$. Результаты занесите в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения полного сопротивления катушки без сердечника

№	Напряже- ние $U, В$	Ток			Сопротивле- ние $Z, Ом$
		$I_A, А$	$I_V, А$	$I_K, А$	
1					
2					
...					
5					

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

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

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

3.5.1. Вставьте в катушку сердечник и вновь повторите все измерения согласно пп. 3.4.1–3.4.3.

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

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

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

3.6.2. Рассчитайте среднюю магнитную проницаемость μ_c сердечника, используя соотношение:

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

3.7. *Сделайте вывод.*

4. Вопросы для самоподготовки

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

4.2. Какие существуют способы определения индуктивности?

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

4.5. Почему при переменном токе сопротивление катушки увеличивается?

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

4.7. Как определить направление индукционного тока?

4.8. Зависит ли индуктивность катушки от величины приложенного напряжения?

4.9. Как влияет железный сердечник на величину индуктивности катушки?

4.10. Если напряжение на активном сопротивлении равно 20 В, а на последовательно включённой с ним катушке индуктивности – 40 В, то каково напряжение, приложенное к данной цепи?

4.11. Почему сопротивление катушки называют реактивным?

4.12. Зависит ли угол сдвига фаз между током и напряжением от числа витков катушки и марки железного сердечника?

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

4.14. В каких устройствах используют катушки без сердечника и в каких устройствах используют сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса?

Список рекомендуемой литературы

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с.

2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стереотип. – Москва : Академия, 2008. – 560 с.

3. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техн. и технолог. направлениям и специальностям : в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – 4-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 352 с.

4. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техн. и технолог. направлениям и специальностям : в 3 т. Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – 4-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 480 с.

Составители

Коллектив авторов кафедры физики

Лабораторный практикум по физике

Методические указания к лабораторным работам
по курсу физики для обучающихся всех специальностей и направлений
бакалавриата всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 03.06.2019. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 4,5.

Тираж 20 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.