

**РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН  
НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ  
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ**

**ЭНЕРГО МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА «ОБЩАЯ ФИЗИКА»**

**МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

*УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ*



**Навои –2018 г.**

Настоящие учебно-методическое пособие предназначены для студентов бакалавриатов по выполнению лабораторных работ по физике «Механика и молекулярная физика электричество». В пособие рассматриваются 14 лабораторных работ и их методы выполнения. Особое внимание обращено на их теоретические основы и выводы, рабочие формулы, а также цель опыта и порядок выполнения работы.

В приложении приводятся основные физические постоянные и их единицы измерения, которые могут использовать студенты при выполнении лабораторных работ.

Настоящий учебно-методическое пособие предназначен для студентов технических ВУЗов, изучающих курс общей физики всех форм обучения.

Учебно-методическое пособие утверждена «26» май 2018 г. (Протокол № 5) на методического Совета Навоийского государственного горного института.

**Составители:**

**К.н.ф-м. доц. Урунов И.О.**

**Асс. Байчаев Ф.Х**

**Реценденты:**

**К. н. ф-м.доцент НГПИ: Избосаров Б.Ф.**

**Декан энерго механического факультета НГГИ  
кафедры «Общая физика» профессор: С.Дж. Бозорова**

## Предисловие

Важность физики в развитии современной науки и техники имеет большое значение, поэтому преподавание физики в подготовке высококвалифицированных инженеров в высших учебных заведениях имеет большое значение.

Следующие цели включены в курс общей физики:

а) содействие будущим инженерам в глубоком изучении основных физических законов и явлений;

б) Творческий подход к научным исследованиям студентов, точный подбор экспериментальных методов, измерение значений физических величин и их формул;

с) ввести методы математических методов современных и зарубежных приборов и результаты физических измерений.

Лабораторные упражнения в высших учебных заведениях могут быть организованы тремя способами: фронтальной, лабораторной работы и цикла.

На фронте каждый студент сможет выполнить определенную тему, связанную с темой, упомянутой в лекции. Этот метод облегчает организацию и проведение урока посредством управления курсом студентов. Метод фронтальной обработки Лаборатории должны иметь несколько одинаковых устройств.

Лабораторные упражнения проводятся отдельно для каждого учащегося независимо от того, выполняются они или нет. Смысл этих работ отличается от того, как они работают.

В циклическом режиме лабораторные работы сгруппированы на основе определенных разделов курса общей физики или путем комбинирования различных измерительных методов любого размера. Этот метод позволяет адаптировать темы лабораторных и лекторий. Позволяет использовать эффективные опции для группировки лабораторных операций.

### **Общие требования.**

Для более эффективного выполнения лабораторных работ необходимо повторить соответствующий теоретический материал, а на занятиях, прежде всего, внимательно ознакомиться с содержанием работы и оборудованием.

В ходе работы необходимо строго соблюдать правила по технике безопасности; все измерения производить с максимальной тщательностью; для вычислений использовать микрокалькулятор.

После окончания работы каждый учащийся составляет отчет по следующей схеме:

1. Дата, наименование и номер работы;
2. Тема работы
3. Цель работы
4. Перечень оборудования;
5. Схема или зарисовка установки;
6. Запись цены деления шкалы измерительного прибора;
7. Таблица результатов измерений и вычислений заполняется по ходу работы;
8. Расчетная формула, обработка результатов измерений и определение относительной погрешности.

## **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

*Во время выполнения лабораторной работы студент обязан:*

- соблюдать настоящую инструкцию и инструкции по выполнению конкретной лабораторной работы, правила эксплуатации оборудования и приспособлений;
- находиться на своем рабочем месте;
- неукоснительно выполнять все указания преподавателя
- соблюдать осторожность при обращении с оборудованием, приспособлениями;
- режущие и колющие инструменты класть на рабочем месте острыми концами от себя;
- при нагревании жидкости в пробирке или колбе использовать специальные держатели (штативы);
- жидкости и твердые тела нагревать до температуры не выше 70 градусов;
- при работе с открытым огнем беречь одежду и волосы от возгорания; соблюдать осторожность при обращении с приборами и лабораторной посудой из стекла;
- следить за исправностью всех креплений в приборах и приспособлениях;
- при сборке электрической схемы использовать провода с наконечниками без видимых повреждений изоляции, избегать пересечения проводов, источник тока подключать в последнюю очередь;
- напряжение подавать на собранную электрическую схему только после ее проверки преподавателем и получением его разрешения;
- наличие напряжения в электрической цепи проверять только с помощью электроизмерительных приборов;
- не допускать попадания влаги на поверхность оборудования и химических реактивов;
- постоянно поддерживать порядок и чистоту на своем рабочем месте.

## ФРОНТАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

### ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Научиться правильно пользоваться микрометром и штангенциркулем и вычислять абсолютную и относительную погрешности прямых и косвенных измерений.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: микрометр, штангенциркуль, измеряемые предметы.

#### Теоретическое введение

Измерить какую-либо величину - значит узнать, сколько раз заключается в ней однородная величина, принятая за единицу измерения.

Измерения физических величин делятся на прямые и косвенные.

Измерения, результат которых непосредственно дает искомую величину, называются ПРЯМЫМИ измерениями. Например: длины, времени и т.д.

Измерения, в которых для определения искомой величины требуются какие-либо математические операции над результатами прямых измерений, называются КОСВЕННЫМИ.

Например: из периода колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{можно, определить} \quad g = \frac{4\pi^2}{T^2} l$$

Здесь измерения  $l$  и  $T$  являются прямыми, а  $g$  - косвенным измерением

Измерить физическую величину абсолютно точно невозможно, так как всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой или погрешностью. Погрешности или ошибки измерений бывают систематические и случайные.

**СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ** обусловлены неточностью измерительных приборов, несовершенством метода измерения. Они сохраняются от опыта к опыту, их можно учесть и исключить.

**СЛУЧАЙНЫЕ ОШИБКИ** вызываются разными причинами и не могут быть исключены. К этим причинам можно отнести колебание внешних условий, несовершенство органов чувств, неточность показаний приборов. Они обнаруживаются только при многократном измерении искомой величины, как отклонения от некоторого среднего значения. Они различны по величине и по направлению.

**ПРОМАХИ** или грубые ошибки происходят в результате невнимательности экспериментатора, которая приводит к неправильности отсчета по шкале прибора, неверной записи показаний и т.д. Такие ошибки можно обнаружить при повторном измерении.

При обработке результатов промахи из рассмотрения исключаются. Наличие этих ошибок приводит к тому, что искомая величина всегда определяется с некоторыми отклонениями, которые называются погрешностями. Погрешности делятся на абсолютные и относительные.

Абсолютной погрешностью  $\Delta a$  называется разность между полученным при измерении значением  $a_0$  и искомым значением измеряемой величины.

$$\Delta a_1 = \bar{a} - a_1$$

Относительная погрешность  $\varepsilon$  равна отношению абсолютной погрешности к искомому значению измеряемой величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{\Delta a}{a} \cdot 100\%$$

### Определение погрешности при прямых измерениях

При прямых измерениях – самой ответственной части лабораторной работы – величину надо измерить несколько раз. При этом –

- 1) измерения данной величины надо обязательно проводить нечетное число раз, обычно 5 раз.
- 2) точность измерения данной величины должна быть одна и та же, т.е. все числа должны кончатся на одном разряде.
- 3) просмотреть полученный ряд измерений, явно сомнительные результаты отбросить, т.е. исключить промахи. При необходимости повторить измерения.
- 4) вычислить среднее арифметическое значение результата измерений по формуле:

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

- 5) определить абсолютную погрешность каждого измерения

$$\Delta a_1 = \bar{a} - a_1$$

$$\Delta a_2 = \bar{a} - a_2 \quad \Delta a_n = \bar{a} - a_n \quad (2)$$

- 6) для определения абсолютной ошибки результата берут среднее арифметическое абсолютных значений модулей отдельных погрешностей.

$$\bar{\Delta a} = \frac{|\Delta a_1| + |\Delta a_2| + |\Delta a_3| + \dots + |\Delta a_n|}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta a_i|$$

- 7) отношения  $\frac{\Delta a_1}{a_1}; \frac{\Delta a_2}{a_2}; \dots; \frac{\Delta a_n}{a_n}$  - называются относительными ошибками отдельных измерений.

- 8) отношение средней абсолютной ошибки результата  $\bar{\Delta a}$  к его среднему значению  $\bar{a}$  дает среднюю относительную ошибку результата измерений .

$$\varepsilon = \frac{\bar{\Delta a}}{\bar{a}}$$

Относительные ошибки принято выражать в процентах  $\varepsilon = \frac{\bar{\Delta a}}{\bar{a}} 100\%$

- 9) тогда истинное значение измеряемой величины равно

$$a_{ист} = \bar{a} \pm \bar{\Delta a} \quad \text{т.е. оно находится в интервале} \quad \bar{a} - \bar{\Delta a} \leq a_{ист} \leq \bar{a} + \bar{\Delta a}$$

(4)

Часто в работах даются значения некоторых величин, измеренных заранее. В таких случаях абсолютную погрешность принимают равной половине единицы наименьшего разряда. Например: Масса тела  $m = 532,4\text{г}$  то  $\Delta m = 0,05\text{г}$  и следовательно  $m = (532,4 \pm 0,05)\text{г}$

## Инструментальная погрешность

Максимальная абсолютная погрешность прямых измерений складывается из абсолютной инструментальной погрешности и абсолютной погрешности отсчёта при отсутствии других погрешностей:  $\Delta A = \Delta_{\text{и}}A + \Delta_{\text{о}}A$ .

$\Delta_{\text{и}}A$  – абсолютная инструментальная погрешность, определяемая конструкцией прибора (см. таблицу погрешность средств измерения)

$\Delta_{\text{о}}A$  – абсолютная погрешность отсчёта (получающаяся от недостаточно точного отсчёта показаний средств измерения), она равна в большинстве случаев половине цены деления; при измерении времени – цене деления секундомера или часов.

Для определения абсолютной инструментальной погрешности прибора надо знать его класс точности. Класс точности  $\gamma_{\text{пр}}$  измерительного прибора показывает, сколько процентов составляет абсолютная инструментальная погрешность  $\Delta A_{\text{и}}$  от всей шкалы прибора ( $A_{\text{макс}}$ )  $\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta_{\text{и}}A}{A_{\text{макс}}} \cdot 100\%$ .

Класс точности указывают на шкале прибора или в его паспорте. Существуют следующие классы точности электроизмерительных приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Зная класс точности прибора ( $\gamma_{\text{пр}}$ ) и всю его шкалу ( $A_{\text{макс}}$ ), определяют абсолютную погрешность  $\Delta_{\text{и}}A$  измерения физической величины  $A$  этим прибором

$$\Delta_{\text{и}}A = \frac{\gamma_{\text{пр}} A_{\text{макс}}}{100}.$$

Результаты измерений записывать в виде двойных неравенств:

$$A_{\text{пр}} - \Delta A < A < A_{\text{пр}} + \Delta A$$

Готовый результат записывают следующим образом:

$$A = A_{\text{пр}} \pm \Delta A$$

$$\varepsilon = \dots\%$$

## Определение относительной погрешности косвенных измерений

Если искомая величина  $X$  является функцией нескольких переменных  $X = f(a, b, c)$ , то ее относительная погрешность запишется в виде  $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$ , а так как

дифференциал натурального логарифма.  $d(\ln x) = \frac{dx}{x}$  то  $\Delta \ln(x) = \frac{\Delta x}{x}$

$$\text{т.е. } \varepsilon = \frac{\Delta x}{x} = \Delta \ln(x)$$

Таким образом, относительная ошибка результата равна дифференциалу натурального логарифма функции:

Например: если  $x = f(a, b, c)$ , то

$$\varepsilon = \left| \left( \frac{\partial}{\partial a} \ln f \right) \Delta a \right| + \left| \left( \frac{\partial}{\partial b} \ln f \right) \Delta b \right| + \left| \left( \frac{\partial}{\partial c} \ln f \right) \Delta c \right| \quad (6)$$

При нахождении относительной ошибки  $\varepsilon$  результата косвенных измерений надо пользоваться следующими правилами:

1. Прологарифмировать математическое выражение, описывающее искомую величину.

2. Продифференцировать результат по каждой из физических величин, как по независимым переменным:
3. Заменить знаки дифференциалов  $d$  знаками  $\Delta$ , которые обозначают величину погрешности.
4. Заменить у всех членов знаки  $-$  на знак  $+$  для отыскания наибольшего значения погрешностей.
5. Выражение для относительной погрешности различных функции имеют более простой вид, чем для абсолютной погрешности. Поэтому на практике часто находят сперва  $\varepsilon_{(x)} = \frac{\Delta x}{x}$ , а затем находят абсолютную погрешность  $\Delta \bar{x}$ ;

$$\Delta \bar{x} = \varepsilon_{(x)} \cdot \bar{x} \quad (7)$$

Окончательный результат записывают в виде:  $x = \bar{x} \pm \Delta x$ .

$a+b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$
$a-b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$
$a \cdot b$	$a \cdot \Delta b + b \cdot \Delta a$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
$\frac{a}{b}$	$\frac{a \cdot \Delta b + b \cdot \Delta a}{b^2}$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
$a^n$	$n \cdot a^{n-1} \cdot \Delta a$	$n \cdot \frac{\Delta a}{a}$
$\ln a$	$\frac{\Delta a}{a}$	$\frac{\Delta a}{a \ln a}$
$\sin \varphi$	$\cos \varphi \cdot \Delta \varphi$	$\operatorname{ctg} \varphi \cdot \Delta \varphi$
$\cos \varphi$	$\sin \varphi \cdot \Delta \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi \cdot \Delta \varphi$
$\operatorname{tg} \varphi$	$\frac{1}{\cos^2 \varphi} \Delta \varphi$	$\frac{2 \varphi}{\sin^2 \varphi}$

### Правила нахождения результатов косвенных измерений и вычисления погрешностей

1. Записать результаты всех измерений в таблицы, которые являются основным протоколом опыта, куда заносятся результаты всех измерений и расчетов.
2. Для более точного и надежного определения искомой величины рекомендуется найти ее среднее значение  $\bar{x}$ , используя для расчета результаты прямых измерений различных величин, определяемых несколько раз.

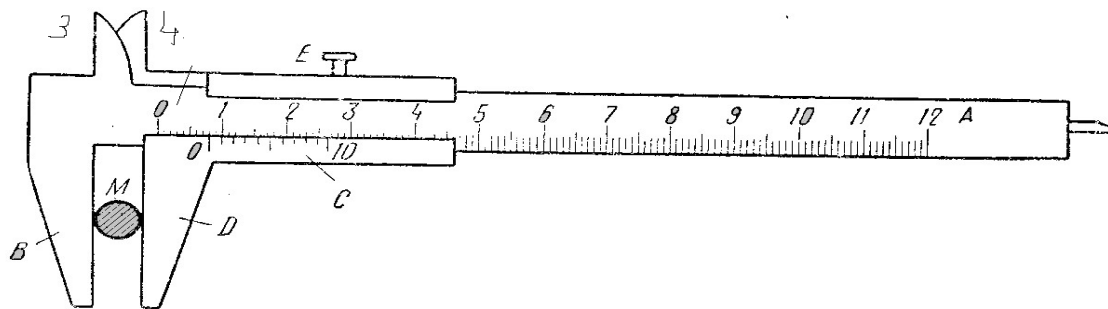
В этом случае следует:

- а) найти среднее значение результата нескольких прямых измерений;
- б) подставить их в основную расчетную формулу, а так же остальные физические величины. Все величины следует подставлять в одной системе единиц (СИ, СГС);

- в) найти относительную погрешность среднего значения искомой величины по методу косвенных измерений, воспользовавшись правилом, приведенным выше.  
 г) найти абсолютную погрешность среднего значения искомой величины по формуле(7), указать ее размерность, округлить ее.  
 д) записать окончательный результат косвенных измерений.

### Ознакомление с приемами измерений линейных величин. описание измерительных приборов

**Штангенциркуль** представляет собой линейку с делениями, на одном из концов которой выступ В.



Вдоль линейки перемещается рамка С с таким же выступом Д. На подвижной рамке находится нониус С. Если выступы В и Д сдвинуть до соприкосновения, то нуль масштабной линейки должен совпадать с нулевой чертой нониуса.

Измеряемый предмет осторожно плотно зажимают между выступами В и Д и рамка С закрепляется на масштабной линейке с помощью винта Е. Некоторые штангенциркули имеют еще выступы 3 и 4, которые дают возможность измерять внутренний диаметр трубок и отверстий.

Результаты измерений, проведенных штангенциркулем, определяются по формуле:

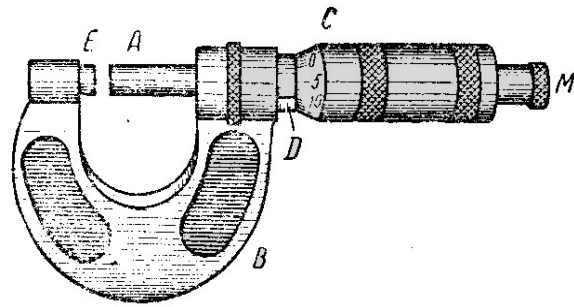
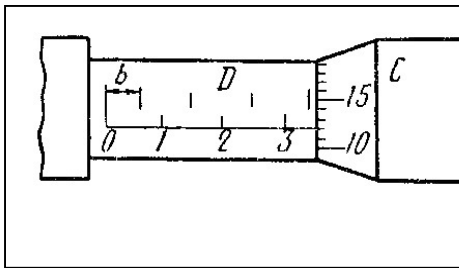
$$L = l\alpha + \frac{\alpha}{n}k \quad (8)$$

где  $\alpha$  - цена наименьшего деления основной шкалы,  $l$  - число делений основной шкалы до нуля шкалы нониуса;  $n$  - число делений нониуса;  $k$  - номер деления нониуса, совпадающего с одним из делений основной шкалы.

Практически отсчет по штангенциркулю можно производить так: записать число миллиметров по основной шкале и прибавить число десятых долей миллиметра отсчитанных по нониусу, например: до нуля нониуса находится 11 полных делений основной шкалы, а восьмое деление нониуса совпадает с одним из делений штангенциркуля.

Можем написать:  $11 + 0,8 = 11,8(\text{мм})$

**Микрометр** состоит из двух основных частей: скобы В и микрометрического винта А. Микрометрического винта А проходит через отверстие скобы В с внутренней резьбой. Против микрометрического винта, на скобе, имеется упор Е. На микрометрическом винте закреплен полый цилиндр (барaban) С с делениями по окружности. При вращении микрометрического винта барабан скользит по линейной шкале, нанесенной на стебле Д.



Головка М снабжена передачей, благодаря которой винт автоматически выключается, как только предмет зажат достаточно плотно. Иногда микрометры бывают снабжены трещеткой, звук которой указывает, что винт выключился и не надо больше вращать головку. При одном полном повороте винта, связанный с ним барабан переместится на величину, которая определяется шагом винта. Следовательно, о расстоянии между упорами Е и А можно судить по положению барабана на трубке Д. Поэтому нанесены параллельно оси стержня две шкалы, позволяющие определить положение барабана.

Нижняя шкала разделена на миллиметры, а штрихи верхней шкалы делят каждый миллиметр пополам. Т.е. цена наименьшего деления линейки определяется расстоянием между штрихами верхней и нижней шкалы.  $b = 0,5 \text{ мм}$ . На самом барабане С также нанесены деления, по которым можно установить, на какую часть шага винта отошел барабан от ближайшей черты слева на шкале трубки Д.

Барабан разделен на 50 делений, а один оборот барабана передвигает его край на 0,5 мм, следовательно каждое деление барабана соответствует сдвигу на  $0,5/50 = 0,01 \text{ мм}$ . Это определяет точность микрометра.

При расчете длины, измеряемой микрометром, можно воспользоваться той же формулой, что и в случае штангенциркуля.

$$L = l \cdot \alpha + \frac{\alpha}{n} \cdot k$$

причем  $l$  - означает число делений шкалы Д до края барабана,  $\alpha$  - цена деления шкалы  $b=0,5 \text{ мм}$ ,

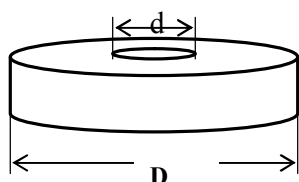
$n$  - число делений на барабане,  $k$  - деление барабана, совпадающее с горизонтальной чертой на трубке Д.

Практически отсчет по микрометру можно производить так: записать число целых миллиметров до края барабана. Если край барабана перешел за половину миллиметра, то прибавить 0,5 мм к этому числу целых миллиметров и к полученной сумме прибавить сотые доли миллиметра, отсчитанные по барабану. Например:  $18+0,5+0,15=18,65 \text{ мм}$

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Измерение объем кольца.

Определить объем тела /пластинки/, имеющей форму плоского кольца по формуле:



$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}^2 - \bar{d}^2) \cdot \bar{h} \quad (1) \quad \text{где } D - \text{внешний}$$

диаметр отверстия,  $d$  - внутренний диаметр отверстия,  $h$  - толщина пластинки.

Для измерения  $D$  и  $d$  следует воспользоваться штангенциркулем, а для измерения  $h$  микрометром. Толщина пластинки значительно меньше, чем ее остальные размеры, и поэтому следует измерять более точным прибором, чтобы относительные погрешности всех измерений были одного порядка.

Результаты измерений занести в таблицу № I.

№	D (мм)	$\Delta D$ (мм)	D (мм)	$\Delta d$ (мм)	h (мм)	$\Delta h$ (мм)
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
Ср.з						

Рассчитать погрешность для первой пластины по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta \bar{D} + \Delta \bar{d}}{\bar{D} + \bar{d}} + \frac{\Delta \bar{D} - \Delta \bar{d}}{\bar{D} - \bar{d}}$$

Расчетные формулы

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}^2 - \bar{d}^2) \bar{h} \quad \varepsilon = \frac{\Delta \bar{V}}{\bar{V}} \quad V = \bar{V} \pm \Delta \bar{V}$$

### Правила приближенных вычислений

При выполнении вычислений необходимо всегда руководствоваться практически необходимой точностью. Проводить вычисления с точностью, большей, чем это допускают данные задачи, бессмысленно.

1. Все цифры, кроме нулей, стоящих впереди числа, называются значащими. Например: в числе 0,00507 – три значащие цифры. Первые три нуля слева – незначащие. Нули, написанные в правом конце числа являются значащими. Например в числе 12,600 – пять значащих цифр.

2. При округлении надо помнить следующие правила.

**П р а в и л о 1.** Если первая из отбрасываемых цифр меньше чем 5 округленных достигается простым отбрасыванием цифр.

*Например:* округление числа 0,4523 дает 0,452 или 0,45.

**П р а в и л о 2.** Если первая из отбрасываемых цифр больше чем 5, то последняя цифра увеличивается на единицу. Последняя цифра увеличивается также и в том случае, когда первая из отбрасываемых цифр равна 5, а за ней есть одна или несколько цифр, отличных от нуля.

*Например:* различные округления числа 3,857 будут 3,86 или 3,9.

**П р а в и л о 3.** Если отбрасываемая цифра равна 5, а за ней нет значащих цифр, то округление производится на ближайшее четное число, т.е. последняя сохраняемая цифра остается неизменной, если она четная и увеличивается на единицу если она нечетная.

*Например:* Число 0,765 округляем до 0,76. Число 0,235 округляем до 0,24.

**П р а в и л о 4.** При сложении и вычитании округление всех чисел производится по правилам 1, 2, 3 до разряда на единицу большего, чем разряд наименее точного

числа, а в результате следует сохранять столько десятичных знаков, сколько их в приближенном данном с наименьшим числом десятичных знаков:

$$1,823 + 5,1 + 14,367 = 1,82 + 5,1 + 14,37 = 16,29 = 16,3.$$

При умножении и делении в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет приближенное данное с наименьшим числом значащих цифр:

$$1,82 \cdot 5,1 = 9,282 \approx 9,3$$

При возведении в степень в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет возводимое в степень приближенное число:  $(12,32)^2 \approx 151,29 \approx 151,3$

При извлечении корней в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное число:  $\sqrt{8,63} \approx 2,938 \approx 2,94$

При нахождении логарифма приближенного числа нужно брать из таблиц столько знаков, сколько знаков содержит данное число  $\lg 25,6 \approx 1,4082 \approx 1,41$

При вычислении промежуточных результатов следует брать на одну значащую цифру больше, чем указано в правилах округления.

В окончательном результате эта “запасная” цифра отбрасывается по правилам округления.

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие физические измерения называются прямыми? Какие косвенными?
2. Какие бывают классы ошибок? Чем они могут быть вызваны? Как их можно учесть?
3. Что называются абсолютной и относительной погрешностью измерения? Какова их размерность?
4. Как определяется абсолютная погрешность одного измерения?
5. Какое существует соотношение между истинными и средними значениями искомой величины?
6. Какие существуют правила округления и как их соблюдать при проведении математических операций над числами?
7. Как определяется абсолютная погрешность функции одного или нескольких переменных?
8. Чему равна относительная погрешность функции одной и нескольких переменных? Сформулируйте правило определения относительной погрешности результата косвенных измерений.

# Лабораторная работа № 1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

**Цель работы:** измерить время и среднюю скорость падения шарика, определить значение ускорения свободного падения.

**Приборы и принадлежности:** Базовый блок Cobra4, метровая шкала (демонстрационная,  $l = 1000$  мм), устройство с падающим шариком, соединительные шнуры, ПК с USB-интерфейсом, Windows XP или выше

### Теоретическое введение

Сила тяготения  $F_T$  к Земле, находящегося на ней любого тела направлена к центру Земли и по закону Ньютона равна:

$$F_T = \gamma \frac{mM}{R^2}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса тела,  $M$  – масса Земли,  $\gamma$  – гравитационная постоянная ( $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}^{-2}$ ),  $R$  – расстояние от тела до центра Земли.

Наблюдения показывают, что сила  $\vec{F}_T$  вызывает два вида движения тела: 1) тело, лишенное опоры, падает на Землю; 2) тело, находящееся в некоторой точке с географической широтой  $\varphi$ , участвует в суточном вращении Земли, т.е. движется

по окружности, плоскость которой перпендикулярна к оси вращения Земли (рис. 1).

В последнем случае

центростремительная сила  $\vec{F}_c$  обуславливает участие тела в суточном вращении Земли (рис.1). Она направлена к центру окружности  $O_1$  радиуса  $r_\varphi$  по которой движется тело, находясь на некоторой географической широте

$\varphi$  и численно составляет:  $F_c = \frac{mv^2}{r_\varphi} = m\omega^2 r_\varphi$ ,

где  $v = \omega r_\varphi$  – линейная скорость тела;  $\omega$  – угловая скорость суточного вращении Земли.

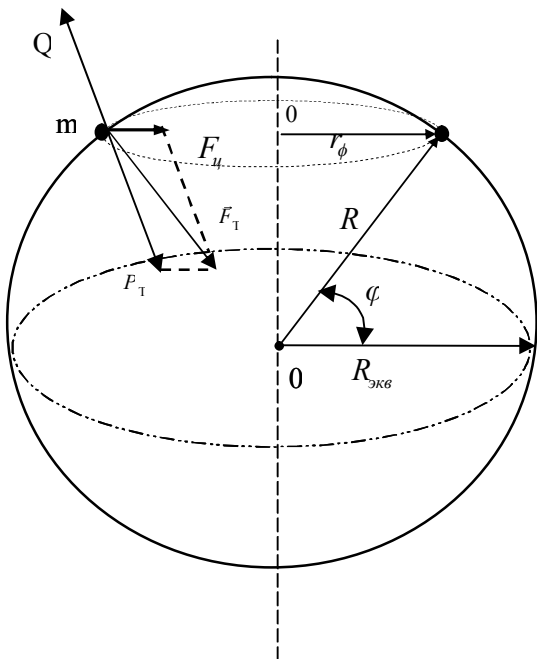


Рис.1.

Но  $r_\varphi = R \cos \varphi$ , следовательно

$$F_c = m\omega^2 R \cos \varphi. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что числовое значение центростремительной силы зависит от географической широты  $\varphi$  того места, где находится тело. На полюсах

$\varphi = \frac{\pi}{2}$ , следовательно  $F_{ц} = 0$ , а на экваторе -  $\varphi = 0$  и сила достигает своего максимального значения  $-m\omega^2 R$ .

Известно, что сила  $\vec{P}_T$ , называемая силой тяжести, вызывает падение незакрепленного тела на Землю; точка приложения силы тяжести называется центром тяжести тела, причем центр тяжести тела совпадает с центром его массы (центром инерции).

Как видно из рис.1, во всех точках земной поверхности, за исключением полюсов, сила тяжести меньше силы тяготения  $F_T$ . Кроме того, везде, кроме полюсов и экватора, вектор  $\vec{P}_T$  направлен не к центру Земли, а несколько в сторону, т.е. не перпендикулярен к поверхности Земли. Для силы тяжести на полюсах (здесь она равно силе тяготения) и на экваторе можно записать:

$$P_{T_{пол}} = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{R_{пол}^2}, \quad P_{T_{экв}} = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{R_{экв}^2} - m \cdot \omega^2 \cdot R_{экв} = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{R_{экв}^2} \cdot \left(1 - \frac{m\omega^2 R_{экв}^3}{\gamma \cdot M}\right),$$

где  $R_{пол} = 6357$  км и  $R_{экв} = 6378$  км – соответственно полярный и экваториальный радиусы Земли. Небольшое различие величин  $R_{пол}$  и  $R_{экв}$  связано с тем, что как сказано выше, форма Земли не строго сферическая, а близка к эллипсоиду вращения. Сила тяжести численно равна силе реакции земной поверхности (Q) (рис.1).

Сила, с которой тело действует на горизонтальную опору или подвес, вследствие притяжения к Земле, называется весом тела  $\vec{P}$ . Во всех инерциальных системах отсчета вес тела одинаков и численно равен силе тяжести; причем как уже отмечалось, точка приложения силы тяжести – это центр масс тела, точка же приложения веса – опора или подвес:

$$\vec{P} = \vec{P}_T. \quad (4)$$

Движение тела под действием одной только силы тяжести  $\vec{P}_T$  называется свободным падением, а ускорение  $\vec{g}$ , приобретаемое при этом телом, называется ускорением свободного падения или ускорением силы тяжести. По второму закону

Ньютона:

$$\vec{g} = \frac{\vec{P}_T}{m} \quad (5)$$

или учитывая равенство (4):

$$\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}, \quad (6)$$

Отметим, что величина  $\vec{g}$  для гравитационного поля является его силовой характеристикой и в этом аспекте называется напряженностью гравитационного поля.

В большинстве практических задач можно пренебречь влиянием суточного вращения Земли на вес тела (погрешность составляет 0,345%) и считать что:

$$P = mg = \gamma \frac{mM}{R^2} \quad (7)$$

$$\text{отсюда: } g = \gamma \frac{M}{R^2} \quad \text{или точнее} \quad g = \gamma \frac{M}{(R_{0cp} + h)^2}, \quad (8)$$

здесь  $R_{0cp}$  - средний радиус поверхности Земли ( $R_{0cp} = 6,371 \cdot 10^6 \text{ м}$ );  $h$  - расстояние от центра тяжести тела до поверхности Земли.

Из (8) следует: а) ускорение силы тяжести не зависит от массы, размеров и других характеристик тела, поэтому все тела в безвоздушном пространстве свободно падают с одинаковым ускорением;

б) при удалении от поверхности Земли ускорение силы тяжести изменяется по закону:

$$\frac{g}{g_0} = \left( \frac{R}{R_{0cp}} \right)^2 = \left( \frac{R_{0cp} + h}{R_{0cp}} \right)^2 = \left( 1 + \frac{h}{R_{0cp}} \right)^2, \quad (9)$$

где  $g$  и  $g_0$  - ускорение силы тяжести соответственно на высоте  $h$  и у поверхности Земли.

Пусть тело массой  $m$  падает в постоянном гравитационном поле под действием только силы тяжести. Рассмотрим это в системе координат, где падение происходит по вертикальной оси  $x$ . Тогда уравнение движения тела есть

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \quad (10)$$

Если действует сила сопротивления, в правую часть уравнения (5) она должна быть добавлена с отрицательным знаком, так как направлена против движения. При отсутствии силы сопротивления начальные условия есть:  $x(0) = 0$ , (начало оси  $x$  выбрано в точке начала падения тела) и скорость  $v(0) = 0$ . Решение этого уравнения есть функция

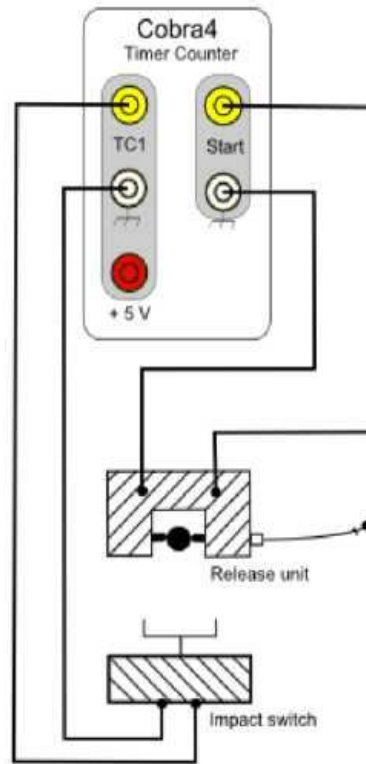
$$x = \frac{gt^2}{2} \quad (11)$$

Измеряя время падения тела и расстояние, которое оно прошло за это время, можно из (6) вычислить ускорение свободного падения. Прибор в данной работе измеряет лишь среднюю скорость падения с некоторой высоты. Нетрудно получить формулу для средней скорости падения, выраженную через высоту, с которой тело падает:

$$v_{cp}^2 = \frac{gh}{2} \quad (12)$$

## Методика эксперимента и экспериментальная установка

Работа состоит из двух упражнений. В первом измеряется время падения шарика, во втором - средняя скорость его падения.



### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

*Упражнение 1. Измерение времени падения шарика.*

1. Зафиксируйте шарик в расцепляющем механизме, нажимая на кнопку тростка 1
2. Поднимите (опустите) уловитель до необходимой высоты.
3. Отпустите шарик, отжав кнопку тростка.
4. Базовый блок Cobra4 покажет время падения.



5. После каждого измерения, записав значение времени, обнулите результат, нажав кнопку ZERO.
6. После этого можете проводить следующее измерение.

7. Измерьте 3-5 раз время падения для одной и той же высоты.
8. Эти измерения проделать для шести значений высоты, начиная, например, с 200 мм.
9. Все измеренные значения, включая значения высоты и вычисленное среднее значение времени для каждой высоты, занести в таблицу 1. Сюда же занести вычисленные значения отклонения времени от среднего и абсолютную ошибку на время падения (два последних столбца)

Результаты измерений. Таблица 1

Номер опыта	Высота падения $h$ (мм)	Время падения $t$ , (мс)	Среднее время падения для данной высоты, $t$ (мс)	$\Delta t$ (мс)

Постройте график зависимости высоты от времени падения. По оси абсцисс отложите квадрат времени. Как следует из соотношения (2), зависимость между  $h$  и  $t$  прямо пропорциональная. Удвоенный тангенс угла наклона прямой к оси  $t^2$  дает значение ускорения свободного падения. Определите его из графика.

### **Контрольные вопросы:**

1. Почему сила тяжести, хоть и незначительно, отличается от силы притяжения тела к Земле?
2. Получите выражение силы тяжести тела на экваторе.
3. Одинаковая ли сила тяжести действует на два одинаковых шара, если один из них плавает в воде, а другой лежит на столе?
4. На какой высоте от поверхности Земли ускорение свободного падения уменьшается в 10 раз по сравнению с ускорением свободного падения у поверхности Земли?
5. Какое движение тела называется свободным падением?
6. Выведите формулу (4) для зависимости ускорения свободного падения тела от его высоты над поверхностью Земли.

## Лабораторная работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА МАЯТНИКОМ ОБЕРБЕКА

**Цель работы:** нахождение момента инерции вращающегося твердого тела.

**Приборы и принадлежности:** маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль.

#### Теоретическое введение

Действие силы, которая приводит тело во вращательное движение, зависит от того, на каком расстоянии от оси вращения она приложена. Одна и та же сила может сообщить телу различные угловые ускорения  $\varepsilon$ , если она приложена на различных расстояниях от оси вращения. В связи с этим вводят понятие «момент силы».

Моментом силы  $M$  относительно точки (центра вращения) называется векторная величина, численно равная произведению силы на плечо.  $M = Fl$  (1)

Плечом называется перпендикуляр, опущенный из центра вращения на линию действия силы.

Момент инерции является физической величиной, характеризующей инертность тела к изменению им угловой скорости под действием вращающегося момента.

Моментом инерции материальной точки относительно оси вращения называется произведение массы точки на квадрат ее расстояния от оси вращения :  $I = mr^2$  (2)

Размерность момента инерции в системе СГС:  $[ I ] = \text{г.см}^2$ , в системе СИ:  $[ I ] = \text{кг.м}^2$ .

В поступательном движении тело массой  $m$  получает под действием силы  $F$  всегда одно и то же ускорение. Связь между силой, массой и ускорением выражается вторым законом Ньютона:

$$F = m \cdot a \quad (3)$$

Связь между  $[ M ]$  и  $[ I ]$  дается основным законом динамики вращательного движения:

$$M = I \frac{d\omega}{dt} = I\varepsilon \quad (4)$$

#### Описание прибора и метода работы

Закон вращательного движения можно изучать при помощи прибора изображенного на рис-1.

Крестовина состоит из шкива радиуса  $R$ , закрепленного на оси  $O$ , четырех стержней, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу и четырех одинаковых грузов  $m_1$ , которые можно перемещать вдоль стержней и закреплять на определенном расстоянии от оси. Грузы закрепляют симметрично так, чтобы система была в безразличном равновесии ( т.е. если опустить, то чтобы не вращалась )

Крестовина приводит во вращательное движение силой натяжения нити  $T$ , которая возникает в результате действия груза  $P = mg$  на нить.

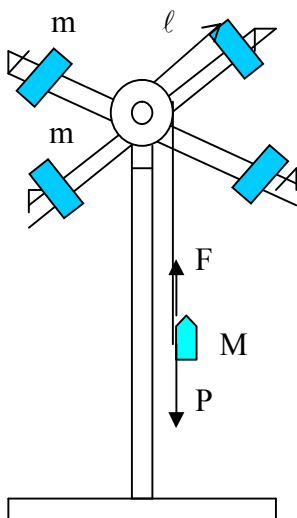


Рис- 1

$$M = T \cdot R \quad (1)$$

где  $T$  – сила натяжения,  $R$  – радиус шкива (плечо силы  $T$ ).

Силу натяжения определяют по второму закону Ньютона для поступательного движения грузов, подвешенного к нити

$$P - T = ma \quad (2)$$

$a$  – ускорение груза.

Груз  $P$ , находится на некоторой высоте  $h$ , обладает потенциальной энергией равной  $mgh$ .

При падении груза  $P$  потенциальная энергия его переходит в кинетическую энергию поступательного движения груза  $\frac{mv^2}{2}$  и кинетическую энергию вращательного движения крестовины  $\frac{I\omega^2}{2}$ , где  $I$  – момент инерции крестовины.

На основании закона сохранения энергии 
$$mgh = \frac{m\vartheta^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + A_{тр} \quad (3)$$

В данной работе трения мало и работой против силы трения можно пренебречь.

При равноускоренном движении,  $v = at$ , а величина ускорения

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

Угловая скорость связана с линейной скоростью  $\vartheta = \omega \cdot R$ . Подставляя  $v$  и  $\omega$  в (3), получим расчетную формулу в виде

$$I = mR^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right) \quad (5)$$

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Грузы снимаем со стержней крестовины.
2. Измеряем штангенциркулем диаметр шкива и вычисляем его радиус  $R$
3. Вращая крестовину, поднимаем площадку на высоту  $h$  над скамейкой и отмечаем это расстояние.
4. Кладем на площадку гирю 200г, предоставляем возможность площадке с гирей падать. Определяем время падения  $t$ , для этого секундомер включаем в момент начала падения и останавливаем в момент удара площадки о скамейку.
5. Повторяем опыт с гирями 300г, 400г., и каждый раз вычисляем момент инерции.
6. Вычисляем момент инерции  $I$  вращающейся системы по формуле (5).
7. Вычислить абсолютную и относительную ошибку измерения.
8. Результаты измерений и вычислений заносим в таблицу.

№	R (м)	m (кг)	t (сек)	h (м)	I (кг,м <sup>2</sup> )	$\Delta I$ (кг, м <sup>2</sup> )	$\varepsilon$ (%)
1.							
2.							
3.							
Ср.з							

**Контрольные вопросы:**

1. Какое движение называется вращательным и какими величинами оно характеризуется?
2. Что называется моментом инерции? В каких единицах он измеряется?
3. Что называется моментом силы и в каких единицах он измеряется?
4. Напишите основной закон динамики вращательного движения.
5. Какой закон положен в основу вывода расчетной формулы (5)?
6. Как практически определить силу трения при движении маятника Обербека?

## Лабораторная работа № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ (ЮНГА) МЕТОДОМ ИЗГИБА

**Цель работы:** Экспериментально определить модуль Юнга для исследуемых пластин. Проверить выполнимость закона Гука для деформации изгиба.

**Приборы и принадлежности:** прибор для определения стрелы прогиба, стержень прямоугольного сечения, набор грузов, штангенциркуль, масштабная линейка.

#### Теоретическое введение

Деформация – это изменение взаимного положения точек тела. Деформации могут возникать в твердых телах при воздействии внешних сил. При этом изменяются форма и размер тела и в теле возникают упругие силы. Если после прекращения действия сил тело восстанавливает свою форму, то деформация упругая. Если же форма тела не восстанавливается, то деформация пластическая.

Наблюдаются следующие виды деформации: растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, кручение; основными из них считаются растяжение и сжатие, т.к. остальные могут быть приведены к этим двум последним.

При упругой деформации её величина (т.е.  $\Delta x$ ) прямо пропорциональна действующей силе  $F_0$ :  $F_0 = k\Delta x$ , а т.к.  $F_{упр} = -F_0$ , то закон Гука можно записать как  $F_{упр} = -k\Delta x$ .

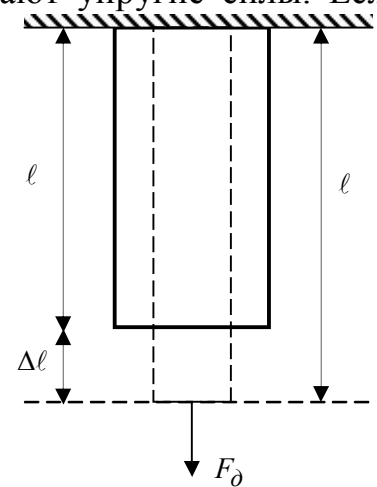


Рис.1

В случае деформируемой пружины коэффициент пропорциональности  $k$  называют жесткостью пружины и он зависит от её материала и размеров.

Рассмотрим деформацию растяжения. Если к концу однородного стержня или проволоки приложить направленную вдоль оси силу  $F_0$ , то произойдет изменение длины  $l_0$  на величину  $\Delta l$  (рис.1), величина  $\Delta l = l - l_0$  называется абсолютным удлинением.

Для характеристики деформации растяжения берут относительное удлинение  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ , т.е. отношение абсолютного удлинения к первоначальной

длине стержня (или проволоки). По закону Гука относительное удлинение стержня прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально площади его поперечного сечения  $S$ :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} = \frac{1}{E} \cdot \sigma. \quad (1)$$

Отношение  $\frac{F}{S} = \sigma$  показывает, какая сила приходится на единицу площади поперечного сечения и называется нормальным напряжением;  $E$  – константа,

характеризующая упругие свойства материала, называемая модулем Юнга. С учетом принятых обозначений закон Гука можно записать в виде:

$$\sigma = E\varepsilon . \quad (2)$$

Из данной формулы для модуля Юнга имеем:  $E = \frac{\sigma}{\frac{\Delta\ell}{\ell_0}}$  и если  $\frac{\Delta\ell}{\ell_0} = 1$ , то  $E = \sigma$ ,

таким образом, модуль Юнга численно равен нормальному механическому напряжению, при котором абсолютное удлинение равно первоначальной длине; т.е.  $\Delta\ell = \ell_0$ . Длина образца при этом увеличивается вдвое. Многие материалы не выдерживают такого напряжения, поэтому вышеприведенное определение модуля Юнга чисто теоретическое.

В системе СИ модуль Юнга измеряется в  $\text{Н/м}^2$ , на практике – в  $\text{кГ/мм}^2$ . Зависимость между механическим напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$  показана на рис.2. Линейная зависимость  $\sigma(\varepsilon)$ , установленная Гуком, выполняется до так называемого предела пропорциональности ( $\sigma_{II}$ ). При дальнейшем увеличении напряжения деформация ещё упругая (хотя зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  уже нелинейная) и до предела упругости  $\sigma_{упр}$  остаточные деформации практически не возникают (участок АВ). За пределом упругости в теле возникают остаточные деформации.

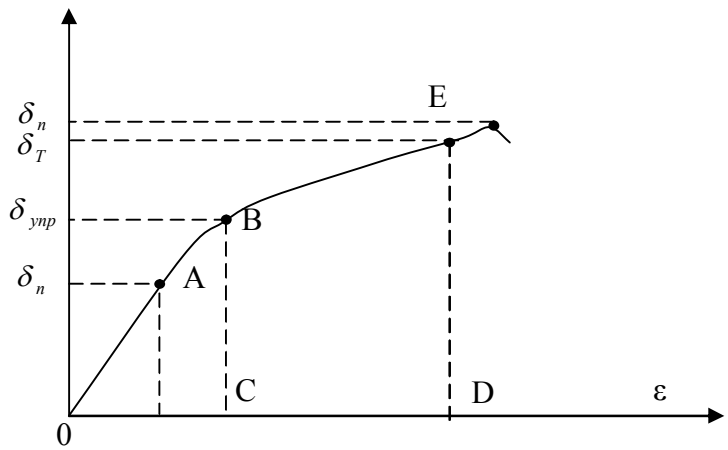


Рис.2.

При таких напряжениях появляется заметная остаточная деформация, кривая на диаграмме почти горизонтальна, данное явление называется текучестью материала. Материалы, для которых область текучести значительна, называются вязкими, а для которых она практически отсутствует – хрупкими. При дальнейшем, например, растяжении тела происходит его разрушение и максимальное напряжение, возникающее в теле до момента его разрушения, называется пределом прочности ( $\sigma_{np}$ ).

Механическое напряжение в продольном направлении, кроме удлинения, вызывает поперечное сжатие стержня; при этом  $\varepsilon_n = -\mu\varepsilon$ , где  $\mu$  - коэффициент Пуассона,  $\varepsilon_n = \frac{\Delta d}{d}$  - относительное изменение поперечного размера стержня здесь  $d$  - диаметр стержня,  $\Delta d$  - изменение поперечного размера (диаметра). Знак минуса указывает на то, что с увеличением продольных размеров образца его поперечные размеры уменьшаются и наоборот. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона полностью характеризуют упругие свойства изотропного материала и не зависят от размеров и формы тела.

## Теория метода и описание установки

Таким образом, деформация изгиба сводится к деформации одностороннего сжатия и растяжения. Мерой деформации изгиба является стрела прогиба  $\lambda$  (рис.4.), равная расстоянию между начальным положением середины стержня (до нагрузки) и конечным (при нагрузке).

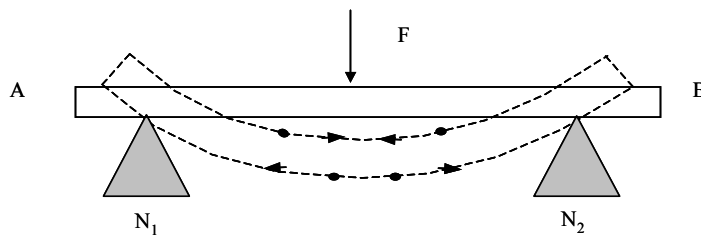


Рис.3.

В теории упругости доказывается, что для стержня прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах, стрела прогиба определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{F\ell^3}{4Eab^3},$$

(3)

где  $\ell$  – расстояние между опорами;  
 $a$  - ширина;  
 $b$  - толщина стержня.

Из формулы (3) находят модуль Юнга:

$$E = \frac{F\ell^3}{4ab^3\lambda}. \quad (4)$$

Прибор для определения стрелы прогиба представляет собой основание, на котором имеются металлические опорные призмы  $N_1$  и  $N_2$  так, что ребра их параллельны между собой. На этих призмах свободно лежит исследуемый стержень АВ, на который сверху опирается трехгранная стальная призма С, с отсчетным устройством. На верхнем конце устройства закреплена площадка S для грузов.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Штангенциркулем измеряют ширину ( $a$ ) и толщину ( $b$ ) исследуемого образца в трех разных точках и находят их соответствующие средние значения.
2. Масштабной линейкой измеряют расстояние  $\ell$  между ребрами опорных призм  $N_1$  и  $N_2$  и на них кладут исследуемый образец (стержень или рейку) симметрично по отношению к призмам.
3. С помощью отсчетного приспособления отмечают так называемое нулевое положение площадки С -  $n_0$  (без нагрузки)
4. Площадку С последовательно нагружают грузами 0,5; 1; 1,5; 2 кг и производят соответственно отсчеты  $n'_1, n'_2, n'_3, n'_4$ . Затем последовательно снимают грузы и вновь производят отсчет по шкале устройства  $n''_3, n''_2, n''_1, n''_0$  (в обратном порядке). Находят среднее значение из отчетов, сделанных для одних и тех же значений груза, взятых соответственно при увеличении и уменьшении нагрузки:

$$\bar{n}_0 = \frac{n_0' + n_0''}{2}, \bar{n}_1 = \frac{n_1' + n_1''}{2}, \bar{n}_2 = \frac{n_2' + n_2''}{2}, \bar{n}_3 = \frac{n_3' + n_3''}{2}, n_4' = n_4'' = \bar{n}_4.$$

5. Определяют стрелу прогиба, соответствующую нагрузкам 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 кГ как разность двух отсчетов:

$$\lambda_1 = \bar{n}_0 - \bar{n}_1, \quad \lambda_2 = \bar{n}_0 - \bar{n}_2, \quad \lambda_3 = \bar{n}_0 - \bar{n}_3, \quad \lambda_4 = \bar{n}_0 - \bar{n}_4.$$

6. формуле (4) величину  $\frac{\ell^3}{4ab^3}$  для удобства обозначают через С т.к она постоянна

и тогда формула (4) примет вид:  $E = C \frac{F}{\lambda}$ . Для каждой нагрузки определяют модуль.

7. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

**Таблица**

№	$a$ (м)	$b$ (м)	$\ell$ (м)	$F$ Н	$n'$ (м)	$n''$ (м)	$n_{ср.}$ (м)	$\lambda$ (м)	$E \left( \frac{H}{m^2} \right)$	$\frac{\langle \Delta E \rangle}{\langle E \rangle} \cdot 100\%$
Ср.з	X	X	X	X	X	X	X			

**Контрольные вопросы:**

1. Что такое деформация? Какие существуют классы и виды деформации?
2. Какие деформации называются упругими? Какому закону они подчиняются?
3. Какова относительная деформация?
4. Объясните физический смысл модуля Юнга, назовите, в каких единицах он выражается в системе СИ.
5. Напишите рабочие формулы.
6. Каковы механические свойства материалов?

## Лабораторная работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

**Цель работы:** Экспериментальное определение ускорения свободного падения методом наблюдения за колебаниями кольца.

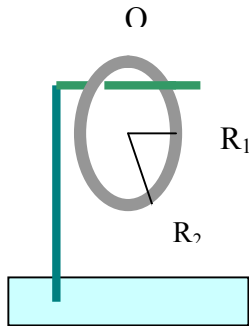
**Приборы и принадлежности:** Кольца, штангенциркуль, секундомер.

#### Теоретическое введение

Колеблющееся на оси кольцо представляет собой физический маятник, период колебаний которого определяется по формуле 
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} \quad (1)$$

Ускорение свободного падения будет равно 
$$g = \frac{4\pi^2 I}{T^2 ma} \quad (2)$$

На рис. представлено качающееся кольцо, где



О – ось качения кольца,

С – центр тяжести кольца,

$R_1$  – внутренний радиус кольца,

$R_2$  – внешний радиус кольца.

Из чертежа следует, что  $a = R_1$ , тогда по теореме Штейнера для момента инерции кольца  $I$  относительно оси О имеем

$$I = I_o + ma^2 \quad (3)$$

где  $I_o$  – момент инерции кольца относительно центра тяжести, который равен:

$$I_o = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2) \quad (4)$$

$m$  – масса кольца,  $a = R_1$  – расстояние от центра тяжести до точки подвеса.

Подставив значения  $I_o$  – получим выражение для момента инерции относительно оси проходящей через точку О

$$I = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2) + mR_1^2 = \frac{1}{2} m(3R_1^2 + R_2^2) \quad (5)$$

Подставив это выражение в формулу для  $g$  получим

$$g = \frac{2\pi^2(3R_1^2 + R_2^2)}{R_1 T^2} \quad (6)$$

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Штангенциркулем измерить внутренний и внешний диаметры кольца и определить  $R_1$  и  $R_2$ . Замеры каждого диаметра произвести 3 раза.
2. Секундомером измерить время  $n$  полных колебаний и определить периоды колебаний по формуле  $T = \frac{t}{n}$
3. Вычислите ускорение свободного падения по формуле. (6)
4. Опыт провести с одна кольцами.
5. Вычислите абсолютная и относительная погрешность, с которой вы определили ускорение.

$$\Delta g = |g_{cp} - g| ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta g}{g} 100\% ;$$

6. Все данные измерений занести в таблицу, при обработке результатов пользоваться системой СИ.
7. Результаты измерений занести в таблицу.

**Таблица 1**

№	d <sub>1</sub> (мм)	d <sub>2</sub> (мм)	R <sub>1</sub> (мм)	R <sub>2</sub> (мм)	n	t (с)	T (с)	g (м/с <sup>2</sup> )	Δg (м/с <sup>2</sup> )	ε (%)
1.										
2.										
3.										
Ср.зн										

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется физическим маятником, чему равен его период колебания?
2. Что называется моментом инерции ?
3. Запишите и сформулируйте теорему Штейнера.
4. Каким уравнениями описываются колебания физического маятника, что является его решением ?
5. Сделайте вывод расчетной формулы.
6. Что называется ускорением свободного падения и отчего оно зависит?

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЬ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

**Цель работы:** Изучение упругих волн в газах. Определить скорость звука в воздухе при комнатной температуре.

**Приборы и принадлежности:** Базовый блок Собга 3, источник питания 12 V, микрофон с усилителем, круглые опоры с устанавливаемыми в них стойками для источника и приемника звука, Батарея, 9 V, соединительные шнуры

#### Теоретическое введение

Типичный значения скорости, полученные при ее измерении расстояния  $s = 0.3$  м между источником и приемником звука, приведены Таблице-1.

Таблица 1

$v/(м\с)$
338.448
338.438
338.753
337.230
337.258

Средняя скорость звука  $v = 338.0(4) м/с$ . Найденная скорость звука постоянна для различных расстояний между источником и приемником звука. Таким образом, звук распространяется с постоянной скоростью.

В литературных источниках указывается, что скорость звука при  $0^\circ \text{C}$  равна  $v_0 = 331.8 м/с$ , ее температурная зависимость определяется следующим соотношением:

$$v(T) = v_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{273}}$$

Результаты измерений приведенные здесь, были получены при температуре окружающего воздуха  $18^\circ \text{C}$ , рассчитанная скорость звука для этой температуры  $v = 342.6 м/с$ .

#### Экспериментальная установка и ход эксперимента

Скорость звука в воздухе определяется путем непосредственного измерения времени его распространения на известном (измеряемом) расстоянии.

Внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки показаны соответственно на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки. Выход усилителя микрофона с помощью разъема соединяется со входом блока Cobra 3 «Таймер 1».

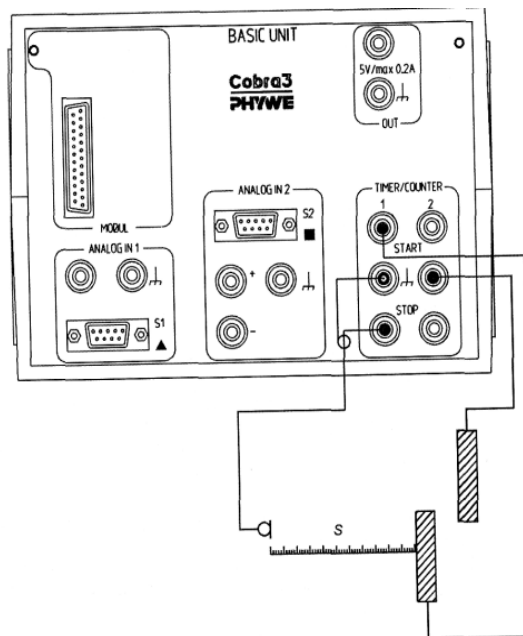


Рис.2. Принципиальная схема установки.

Для измерения частоты запустите программу „Timer / Counter" и установите параметры, показанные на рис. 3.

Звуковой импульс генерируется путем удара двух металлических прутьев друг о друга. Во время этого замыкается электрический контакт, что запускает работу первого таймера (Timer 1). После того, как звук прошел расстояние  $s$ , звуковой импульс регистрируется микрофоном. В этот момент первый таймер выключается. Если расстояние, пройденное звуком, задано заранее (см. рис. 3), то в каждом опыте непосредственно определяется время распространения звука и его скорость  $v = S/t$ .

При проведении опытов необходимо обеспечить приблизительно равную высоту точки удара и точки расположения микрофона, что бы быть уверенным в том, что звук прошел действительно то расстояние, которое было измерено.

Расстояние  $s$  измеряется от передней стороны капсулы микрофона до прута, зажатого в круглой стойке.

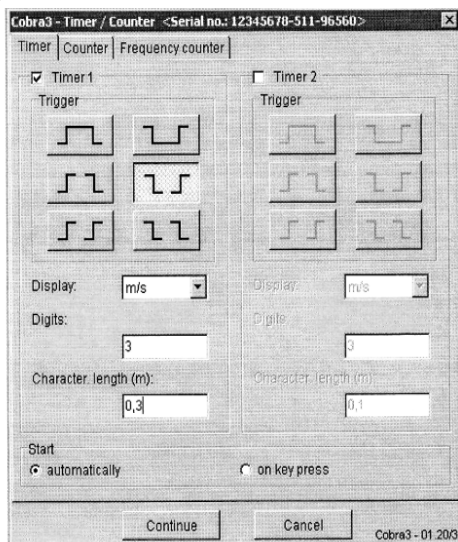


Рис. 3. Окно программы для измерения скорости звука.

Возьмите свободный (не зажатый) металлический прут, и слегка ударьте им по зажатому пруту, расположенному на некотором расстоянии от микрофона. Потом, когда скорость будет измерена, таймер остановится. Иногда таймер после завершения измерения повторно перезапускается, что объясняется послезвучанием свободного прута, которым был произведен удар. В этом случае закончите данный процесс измерения, и начните другое измерение, используя режим автоматического запуска ("Start automatically").

Повторите измерение несколько раз для различных расстояний между источником звука и микрофоном; сравните полученные результаты.

### Замечания

Если работа первого таймера (Timer 1) не прекращается, несмотря на то, что звук прекратился, может быть потребуется подстроить выходное напряжение, снимаемое с выхода усилителя микрофона.

Во время опыта не должно быть никаких фоновых шумов, так как они могут быть зарегистрированы микрофоном, что спровоцирует ложное измерение. Наличие фоновых шумов во время измерения проявляется в виде слишком низких или слишком высоких значений измеренной скорости. По этому признаку результаты этих измерений могут быть легко определены.

Убедитесь, что микрофон не фиксирует никакого звука, распространяющегося по поверхности стола. Скорость звука в деревянных или подобных материалах намного выше, чем это в воздухе. Если все же при измерении получаются слишком высокие скорости, то незакрепленный металлический стержень, используемый для удара, после удара следует помещать либо в пористый материал, либо на массивные основания, установленные на другом столе.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Упражнение 1.** Найдите скорость звука в воздухе при комнатной температуре.

1. Собрать установку согласно рис.1.
2. Соедините выход усилителя микрофона с помощью разъема со входом «Таймер 1» блока Cobra 3.

3. Для измерения частоты запустите программу „Timer / Counter" и установите параметры, показанные на рис. 3.
4. Между источником и приемником звука установите некоторое фиксированное расстояние, равное примерно 30 – 40 см.
5. В соответствии с приведенными описаниями не менее 5 раз проведите измерения скорости звука.
6. Измените расстояние на 10 – 15 см. В соответствии с приведенными описаниями не менее 5 раз проведите измерения скорости звука.
7. Между источником и приемником звука установите расстояние, равное примерно 60 – 70 см. В соответствии с приведенными описаниями не менее 5 раз проведите измерения скорости звука.
8. По результатам выполнения пунктов 5 – 7 заполните следующую таблицу №1. Оцените погрешность измерений.

Таблица №1.

№ опыта	1	2	3	
1				$v_{\text{средняя}}$
2				
3				
4				
5				
$v_{\text{средняя}}$ для опыта				

**Упражнение 2.** С помощью лабораторного термометра измерьте температуру воздуха в комнате. Используя соотношения, приведенные в теоретической части работы, сравнить полученные значения скорости звука с табличными результатами. В качестве известных использовать значения скорости звука при  $0^{\circ}\text{C}$ .

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой звуковые волны в газах?
2. От чего зависит скорость звука в газах?
3. Написать уравнение плоской монохроматической волны.
4. Как связаны волновое число  $K$ , длина волны  $\lambda$ , скорость распространения волны  $v$ , циклическая частота  $\omega$  в звуковой волне.
5. Написать волновое уравнение. Показать, что уравнение плоской волны является решением этого уравнения.5

## Лабораторная работа № 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

**Цель работы:** Экспериментально определить отношение теплоемкостей  $C_p / C_v$  для воздуха.

**Приборы и принадлежности:** стеклянный баллон, насос, водяной манометр.

#### Теоретическое введение

Молярной теплоемкостью  $C_v$  называется количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля газа на  $1^{\circ}\text{K}$ .

$$C_v = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta T} \quad (1)$$

Молярная  $C_v$  и удельная теплоемкость  $c_v$  связаны между собой соотношением:  
 $C_v = \mu * c_v$

Для газов теплоемкость зависит от условий, при которых производится нагревание. Можно производить нагревание при постоянном объеме  $C_v$  или при постоянном давлении  $C_p$ .

Чтобы получить их выражение воспользуемся I началом термодинамики, которое можно сформулировать следующим образом: количество теплоты, переданное системе, затрачивается на увеличение ее внутренней энергии и на работу, совершаемую системой против внешних сил.

$$\Delta Q = dU + \Delta A \quad (2)$$

Если нагревание производится при постоянном объеме (изохорический процесс), газ не совершает работу против внешних сил и вся теплота, сообщаемая газу, идет на изменение его внутренней энергии то есть

$$\Delta Q = \Delta U \quad (3)$$

Изменение внутренней энергии при изменении температуры на  $\Delta T$  будет равно

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (1), получим  $C_v = \frac{i}{2} R$  (5)

где  $i$  - число степеней свободы молекул, т.е. число независимых координат, которые необходимо для определения положения молекулы в пространстве,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Если газ нагревают при постоянном давлении (изобарический процесс), то он расширяется, совершая работу против внешних сил. Подводимое тепло затрачивается на увеличение внутренней энергии и на работу:

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta T} = \frac{\Delta U}{\nu \Delta T} + \frac{\Delta A}{\nu \Delta T} \quad (6)$$

учитывая, что  $\Delta A = P \Delta V$  найдем, что  $P \frac{\Delta V}{\nu \Delta T} = R$  (6)

Окончательно получаем уравнение Мейера:  $C_p = C_v + R$  (7)

Отношение теплоемкостей  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  играет в термодинамике важную роль. .

Отношение  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  зависит от число атомов в молекуле. В настоящей работе определяется  $\gamma$  для воздуха. Воздух состоит в основном из 2-их атомных газов ( $N_2$ ,  $O_2$ ), для него  $i=5$  и  $\gamma_0 = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} = \frac{7}{5} = 1,4$

В частности эта величина входит в уравнение Пуассона  $PV^\gamma = const$ ;  
(8) описывающее адиабатический процесс. Адиабатическим процессом называется такой процесс, который протекает без теплообмена с окружающей средой  $\Delta Q=0$

Метод работы основан на использовании адиабатических процессов.

### Описание метода и установки

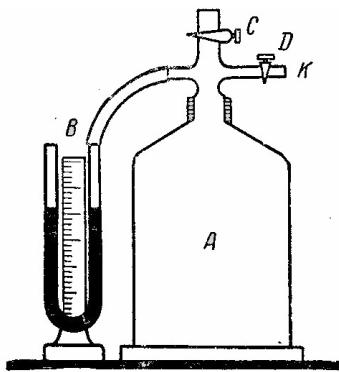


Рис – 1

Величину  $C_p / C_v$  можно определить с помощью прибора Клемана –Дезорма состоящего из баллона А с воздухом, насоса и водяного манометра В.

Сосуд А сообщается с наружным воздухом при помощи крана С и с насосом К при помощи крана Д.

Опыт делается так: открывают кран С для сообщения баллона с атмосферным воздухом. При этом вода в обеих трубках манометра установится на одном уровне. Затем закрывают кран С и при помощи насоса накачивают воздух в баллон (кран Д должен быть при этом открыт).

Когда разность уровней в манометре достигнет 20 – 25 см закрывают кран Д и прекращают накачивание.

Накачивают воздух в баллон очень быстро, поэтому сжатие воздуха в баллоне А можно считать адиабатическим процессом. В результате накачивания воздух в баллоне слегка нагреется, температура его будет немного выше наружного воздуха, с течением времени воздух в баллоне будет охлаждаться и равенность уровней в манометре будет уменьшаться (1 –ое состояние газа).

Запишем установившуюся разность уровней в манометре  $h_1$ .

Откроем кран С и когда прекратится звук выходящего воздуха (внешнее и внутреннее давление сравниваются) закроем кран С.

В результате открывания крана С произошло адиабатическое расширение воздуха внутри баллона А. При этом воздух внутри баллона охладится, его температура будет немного ниже температуры наружного воздуха (2 –ое состояние газа).

Через некоторое время воздух в баллоне нагревается и разность уровней в манометре  $h_2$  будет увеличиваться, Когда температура внутри баллона сравняется с окружающей средой, установится постоянная разность уровней  $h_2$ , объём же останется неизменным (3-е состояние газа).

Переход воздуха из 1 – го состояния  $P_1, V_1, T_1$  во 2 –ое состояние  $P_0, V_2, T_2$  произошел адиабатический, поэтому можно применить уравнение Пуассона

$$P_1 V_1^\gamma = P_0 V_2^\gamma \quad (9)$$

Переход из 1 – го состояния в 3-е.  $P_2, V_2, T_1$  совершен изотермически (т.к.  $T = \text{const}$ ), поэтому применим уравнение Бойля-Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (10)$$

Подставим (10) в (9) и получим: 
$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^\gamma = \frac{P_0}{P_1} \quad (11)$$

Подставляя в (11) значения  $P_1$  и  $P_2$ , выраженные через атмосферное давление  $P_0$  и разность столбов воды в манометре:

$$P_1 = P_0 + h_1$$

$$P_2 = P_0 + h_2$$

получим: 
$$\left(1 + \frac{h_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{h_2}{P_0}\right)^\gamma \quad (12)$$

т.к.  $h_1 / P_0$  и  $h_2 / P_2 \ll 1$ , то можно ограничиться двумя первыми членами биномов, что дает

$$1 + \frac{h_1}{P_0}(\gamma - 1) = 1 + \frac{h_2}{P_2}\gamma \quad (13)$$

Откуда нетрудно получить расчетную формулу:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (14)$$

Относительная погрешность  $\varepsilon$  будет равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{h_2\Delta h_1 + h_1\Delta h_2}{h_1(h_1 - h_2)}$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Открыть краны С и Д и убедиться что вода в обеих трубках манометра находится на одном уровне.
2. Закрывать кран С и быстро накачать воздух в баллон, чтобы разность уровней в манометре достигла 20 – 25 см.
3. Закрывать кран Д и когда установится постоянная разность уровней в манометра произвести её замер с помощью линейки  $h_1$
4. Быстро открыть кран С и когда давление в сосуде станет равным атмосферному закрыть кран С. Произвести второй замер разности уровней  $h_2$ .
5. Опыт повторить 3 раз, результаты занести в таблицу:

№	$h_1$ (см)	$h_2$ (см)	$\gamma$	$\Delta\gamma = \gamma_0 - \gamma$	$\varepsilon = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma} \cdot 100\%$
1.					
2.					
3.					
Ср.з					

### Контрольные вопросы:

1. Что называется теплоемкостью вещества? Чем отличается молярная теплоемкость от удельной? Связь между ними.
2. Какой процесс называется адиабатическим? Запишите его уравнение.
3. Что происходит с внутренней энергией и температурой газа при адиабатическом расширении, сжатии.
4. Что такое  $C_p$  и  $C_v$ ? Почему  $C_p > C_v$ ? Как связаны  $C_p$  и  $C_v$  между собой для идеального газа?
5. Что такое внутренняя энергия газа?
6. Сформулируйте первое начало термодинамики и запишите его для изопроцессов и адиабатического процесса.
7. Что называется числом степеней свободы механической системы?

## Лабораторная работа № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

**Цель работы:** Ознакомиться с явление внутреннего трения, определить коэффициент вязкости глицерина методом Стокса.

**Приборы и принадлежности:** Цилиндр с глицерином, маленькие шарики, масштабная линейка, секундомер, микрометр.

#### Теоретическое введение

Внутреннее трение может иметь место во всех телах, но чаще всего оно возникает в жидкостях и газах при ламинарном (слоистом) течении. Коэффициент внутреннего трения в жидкостях называют вязкостью. Между соприкасающимися слоями ламинарном текущей жидкости возникают силы внутреннего трения, действующие таким образом, чтобы уравнивать скорости всех слоев. Природа этих сил заключается в том, что слои, движущиеся с разными скоростями, обмениваются молекулами.

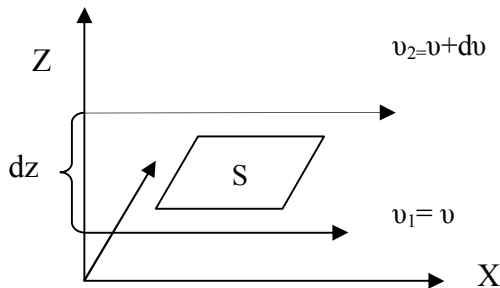


Рис. 1

Молекулы из более быстрого слоя передают более медленному слою некоторое количество движения в результате чего последний начинает двигаться быстрее, Молекулы медленного слоя попадают в более быстрый слой, что приводит к его торможению.

Рассмотрим жидкость, движущуюся в направлении оси X (рис.1)

Пусть, например, 2 слоя жидкости (1) и (2) имеют скорости  $v_1$  и  $v_2$ . Быстрота изменения скорости с расстоянием характеризуется величиной  $\frac{v_1 - v_2}{\Delta Z} = \frac{\Delta v}{\Delta Z}$ , называемый градиентом скорости. Здесь  $\Delta Z$  расстояние между слоями.

Сила внутреннего трения между слоями определяется законом Ньютона

$$F = -\eta S \frac{\Delta v}{\Delta Z} \quad (1)$$

где  $\eta$  - коэффициент внутреннего трения или коэффициент вязкости,  $S$  – площадь слоя.

Размерность коэффициента в системе СГС  $[\eta] = 1 \frac{\text{дин} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = 1 \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}} = 1 \text{Пуаз}$

на системе СИ будет

$$[\eta] = \frac{[F]}{\left[\frac{\Delta v}{\Delta Z}\right][\Delta S]} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} = 10 \text{Пуаз} \quad (2)$$

Это коэффициент вязкости называют также динамической вязкостью, а отношения  $\eta/\rho$  - называют кинематической вязкостью, здесь  $\rho$  - плотность жидкости.

Вязкость жидкости зависит от природы жидкости и от температуры. Как правило чем выше температура, тем меньше вязкость.

При движении твердых тел в вязкой жидкости (или в газе) с достаточно малыми скоростями сопротивление среды обусловлено практически только силами внутреннего трения, действующими на слой жидкости, приливающей к поверхности тела.

По закону установленному Стоксом, сила сопротивления в этом случае пропорциональна динамической вязкости  $\eta$ , скорости движения тела  $v$  и характерному размеру тела  $r$ , т.е.

$$F_C = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

При больших скоростях сила сопротивления движению может быть пропорциональна квадрату и даже кубу скорости  $v$ . В этом случае за телом возникают вихри. Слой жидкости перемещаются, а давление в вихревой области будет понижено.

### Описание метода и установки

Работа выполняется с шарами малого диаметра  $d$ .

Установке состоит из стеклянного цилиндра, наполненного на пытаемой жидкостью, две метки в виде колец  $a$  и  $b$  расположены на расстоянии  $l$  (см рис.2).

На шарик, падающий в жидкости действуют три силы.

1) Сила тяжести  $P$

$$P = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ш} g \quad (4)$$

где  $\rho_{ш}$  – плотность шарика.

2) Сила трения или сила Стокса, направленная против скорости  $F = 6\pi\eta r v$

3) Выталкивающая сила или сила Архимеда, направленная вверх и равная

$$F_A = \rho_{ж} V g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g \quad (6)$$

Где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости.

Сила тяжести и выталкивающая сила при движении шарика остаются постоянными. Сила же внутреннего трения растет по мере увеличения скорости.

Вначале скорость движения шарика возрастает и по второму закону Ньютона

$$m \frac{dv}{dt} = P - (F + F_A) \quad (7)$$

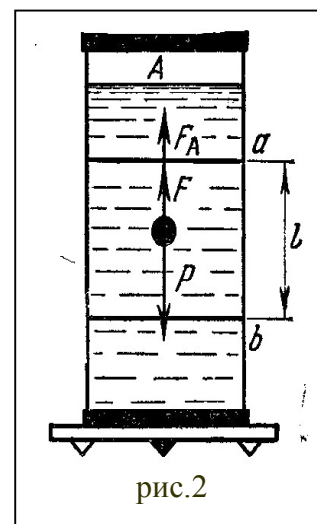
Но по мере увеличения скорости движения наступает такой момент, когда сила тяжести  $P$  уравнивается суммой сил Архимеда и Стокса

$$P = F + F_A \quad (8)$$

С этого момента движение шарика становится равномерным, т.е.

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ш} g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g + 6\pi\eta r v \quad (9)$$

откуда



$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_{ш} - \rho_{ж}) g}{g} \quad (10)$$

Скорость шарика можно определить зная расстояние между метками  $l$  и время падения шарика  $g = \frac{l}{t}$ . Тогда коэффициент вязкости равен:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_{ш} - \rho_{ж}) g t}{l} \quad (11)$$

Если обозначить через  $C = \frac{2}{9} \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж}) g}{l}$  - постоянной для всех опытов, то

$$\eta = Cr^2 t$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить радиус шарика с помощью микрометра.
2. Замерить расстояние  $l$  между двумя горизонтальными метками,
3. Опустить шарик в жидкость у осевой линии цилиндра и замерить время прохождения шарика между метками.
4. Повторить опыт с другими шариками не менее 3 раз.
5. Данные занести в таблицу.
6. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица 1

№	r (мм)	t (с).	l (мм)	$\eta$ ( $\frac{H \cdot C}{M^2}$ )	$\Delta \eta$ ( $\frac{H \cdot C}{M^2}$ )	$\varepsilon = \frac{\Delta \eta}{\eta} 100\%$
1.						
2.						
3.						
Ср.зн.						

### Контрольные вопросы:

1. Чему равна и как направлена сила внутреннего трения двух слоев жидкости?
2. Каков физический смысл коэффициента вязкости? Размерность его.
3. Объясните возникновение сил внутреннего трения с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Дайте вывод формулы для силы внутреннего трения.
4. Как зависит от температуры коэффициент вязкости для газа и жидкости? Объясните разницу.
5. Запишите формулу Стокса и объясните, при каких условиях ею можно пользоваться.
6. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости ?
7. Почему с некоторого момента шарик движется равномерно?

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Цель работы:** экспериментальное нахождение эквипотенциальных линий, использование их для нахождения и построения силовых линий электрического поля заряженных тел различной конфигурации, уметь рассчитать напряженность поля.

**Приборы и принадлежности:** электролитическая ванна, два плоских электрода, гальванометр, милливольтметр, реостат, соединительные провода.

#### *Теоретическое введение*

Полем называют особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между телами. Поле, создаваемое неподвижными зарядами, называют электростатическим. В любой точке этого поля на вносимый «пробный заряд»  $q$  действуют силы  $F$ .

Силовой характеристикой электростатического поля является вектор напряженности  $E$ , определяемый как  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  откуда  $\vec{F} = q\vec{E}$  (1)

Для энергетической характеристики электростатического поля вводится скалярная величина потенциал  $\varphi$ , измеряемый отношением работы сил поля  $A$  при перемещении единицы пробного заряда  $q$  из рассматриваемой точки в бесконечность, т.е.

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q}, \quad A = q\varphi \quad (2)$$

Геометрическое место точек электростатического поля, потенциалы которых одинаковы, называется эквипотенциальной поверхностью.

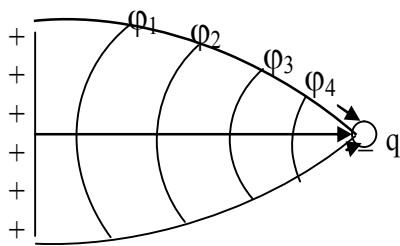


Рис 1

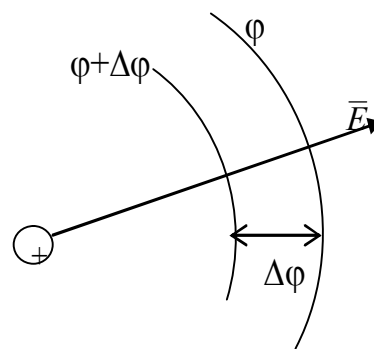


Рис 2

Система эквипотенциальных поверхностей описывает электростатическое поле исчерпывающим образом, так как по ним легко построить силовые линии вектора напряженности  $\vec{E}$  (рис -1), которые в данной точке поля всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям. Если перемещение заряда  $q$  происходит вдоль эквипотенциальной поверхности, для которой  $\Delta\varphi = 0$ , то работа  $\Delta A = q\Delta\varphi = 0$  т.е.

$$\Delta A = F\Delta l \cos \alpha = qE\Delta l \cos(\vec{E}\Delta l) \quad (3)$$

то очевидно, что  $\cos \alpha = 0$ , а угол  $E, \Delta l$  равен  $90^\circ$

Исходя из взаимосвязи напряженности  $E$  и потенциала

$$\vec{E} = -grad\varphi \quad \text{или} \quad E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta n} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

можно по эквипотенциальным линиям найти напряженность  $E$ . Из рис -2 видно, что  $\vec{E}$  направлено всегда в сторону убыли потенциала.

### Описание установки

В ванну, с хорошими электроизолирующими свойствами (плексигласа), помещают металлические электроды А и В, является поле для изучения опыта. Ванна заполняется жидким электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла (необходима вода). Электроды А и В лежат на дне ванны и заливаются водой. В измерительную часть схемы, кроме зонда (Z) входит так же нулевой гальванометр (G), вольтметр (V), делитель напряжения (R). Перемещением движка на делителе напряжения (R) этому движку можно придавать различные значения потенциала относительно электродов, погруженных в ванну. Наличие или отсутствие тока в цепи гальванометра зависит при этих условиях от того в какой точке поля находится зонд. Если он находится в такой точке поля, потенциал которого равен потенциалу движку делителя, то ток в цепи гальванометра и зонда не будет. Эту же схему можно собрать и с источника переменного тока. Тогда вместо нулевого гальванометра в измерительной части берутся наушники. Точно также при помощи зонда сталкиваются нулевые точки по прекращению щелчков в наушниках. Схема будет в этом случае такова:

Геометрическое место точек поля будет равен нулю, образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле. Для измерения потенциала этой поверхности служит вольтметр, включенный между движком и одним из электродов.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собирают схему по рис-3 в зависимости от источника тока. При помощи зонда отыскивают несколько нулевых значений. (8 –10) при данном положении движка, затем положение движки меняем и снова находим несколько нулевых значений. Это повторяют для 6 –7 значений движка напряжения.
2. Координаты всех точек записывают и по ним строят эквипотенциальные линии для данного поля.
3. По полученным данным строят силовые линии. Все построения делаются на миллиметровой
4. Бумаге с указанием места расположения электродов и их форм.

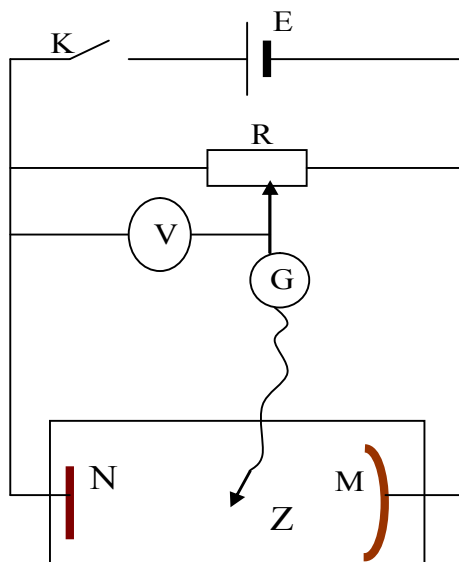


Рис.3 .

Таблица

№	1- ая линия $\varphi = \dots$		2- ая линия $\varphi = \dots$		3- ая линия $\varphi = \dots$		4- ая линия $\varphi = \dots$	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1								
2								
3								
...								

**Контрольные вопросы:**

1. Какое поле называется потенциальным?
2. Что такое эквипотенциальная поверхность?
3. Напишите и сформулируйте теорему Остроградского – Гаусса?
4. Написать закон Ома в дифференциальной форме?
5. Объясните построение эквипотенциальных поверхностей?

## Лабораторная работа № 9

### ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА

**Цель работы:** изучение методики измерения емкости конденсатора с помощью мостиковой схемы.

**Приборы и принадлежности:** реохорд, источник переменного тока, осциллограф или цифровой мультиметр, магазин емкостей, конденсаторы с неизвестной емкостью и известной емкостью, ключ.

#### Теоретическое введение

Опытом установлено, что при сообщении проводнику электрического заряда изменяется его потенциал  $\varphi$ ; для уединенного проводника эта зависимость имеет вид:

$$q = C\varphi. \quad (1)$$

Уединенным проводником называют такой проводник, вблизи которого нет других тел, влияющих на распределение электрического заряда на нем. Постоянная величина  $C$ , характерная для данного проводника, называется электроемкостью или просто емкостью.

Из формулы (1) находим  $C = \frac{q}{\varphi}$ , т.е. ёмкость численно равна заряду, изменяющему потенциал проводника на единицу потенциала.

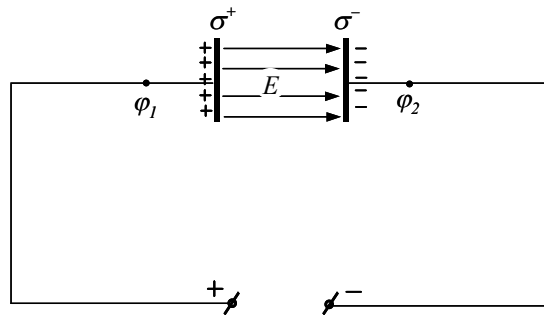


Рис.1

За единицу емкости в системе СИ принимается “Фарад”, 1 Фарад - это емкость проводника, когда заряд в 1 Кл изменяет его потенциал на 1 В.  $1\Phi = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$ .

Фарад очень крупная единица, поэтому пользуются единицей емкости в миллион раз меньшей, т.е. микрофарадой 1 мкФ =  $10^{-6}$  Ф; в системе СГСЕ емкость

измеряется в сантиметрах:  $1\Phi = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = \frac{3 \cdot 10^9 \sqrt{\text{дин}}}{300} \cdot \text{см} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$ , тогда  $1\text{мкФ} = 9 \cdot 10^5 \text{ см}$ .

Емкость проводника зависит от его формы, размеров его поверхности, от диэлектрической проницаемости окружающей среды и от расположения окружающих проводников. Большая емкость проводника позволяет накапливать большие заряды при низком потенциале. Большими емкостями обладают системы проводников, разделенные диэлектриком; такие системы называются конденсаторами (рис.1). Широкое применение в технике имеют конденсаторы

постоянной емкости. Конденсаторы такого типа изготавливаются из большого числа станиолевых пластин, проложенных парафинированной бумагой, в качестве диэлектрика. Необходимо иметь в виду, что под емкостью конденсатора понимают емкость одной пластины в присутствии другой.

Известно, что для прохождения постоянного тока по цепи её необходимо замкнуть. Поскольку в конденсаторе между обкладками находится слой диэлектрика, то следовательно, постоянный ток через конденсатор проходить не будет. При подключении конденсатора к источнику постоянного тока с электродвижущей силой равной  $E$  (э.д.с.) к обкладкам конденсатора притечет некоторое количество электричества  $q = C \cdot E$  (рис. 1), после чего ток прекратится, так как на обкладках возникает напряжение  $U$ , равное по величине э.д.с. и обратного ей направления.

Если же э.д.с. будет по величине и по направлению периодически изменяться, то в цепи установится переменный ток. При переменном токе электроны в металлических проводниках совершают колебательное движение и за один период дважды изменяют направление своего движения. Поэтому переменный ток может течь в цепи, содержащей конденсатор.

Измерение емкости конденсаторов можно произвести с помощью мостика, аналогичного мосту Уитстона. Возможность использования мостовой схемы для определения емкости основана на следующем.

Допустим, что источником тока является генератор переменной э.д.с., изменяющейся по закону синуса:

$$E = E_0 \sin \omega t, \quad (14)$$

где  $E$  - мгновенное значение э.д.с. источника,

$E_0$  - наибольшее значение э.д.с., называемое амплитудным;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  - круговая частота,  $T$ -период,  $t$ - время.

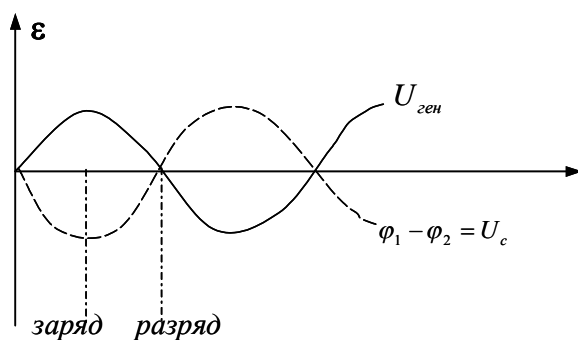


Рис.4

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, в любой момент времени заряжен до такого же напряжения, какое имеет в данный момент источник переменного тока—генератор (или  $E_{ген}$ ). При этом разность потенциалов между обкладками конденсатора  $\phi_1 - \phi_2 = U_c$  направлена навстречу  $E$  (напряжению генератора) (рис.4)

Заряд на обкладках конденсатора в этом случае определяется выражением:

$$q = C E = C E_0 \sin \omega t \quad (15)$$

С изменением напряжения на обкладках конденсатора изменяется и количество электричества. Если ЭДС источника за время  $dt$  изменяется, например, на  $dE$ , то

за это время изменяется и заряд на  $dq$ . Отношение заряда  $dq$  ко времени  $dt$  есть ток  $I$ :

$$I = \frac{dq}{dt} = C\omega E_0 \cos\omega t. \quad (16)$$

При  $\cos\omega t = 1$  ток достигает своего максимального значения:

$$I_0 = \omega C E_0. \quad (17)$$

Если формулу (17) сравнить с формулой закона Ома  $I_0 = E_0/R$ , то можно записать:  $\omega C = \frac{1}{R}$  или  $R = \frac{1}{\omega C}$ , таким образом, величина  $\frac{1}{\omega C}$  играет роль сопротивления, оказываемого конденсатором переменному току; это кажущееся сопротивление называется емкостным сопротивлением  $R_c$  и может быть измерено с помощью мостика Уитстона, в котором течет переменный ток звуковой частоты. В плечи мостика включены конденсаторы с известной емкостью  $C_0$  и неизвестной  $C_x$ . А телефон “Т”, включенный между точками  $M$  и  $D$ , аналогичен гальванометру в мостике Уитстона с постоянным током.

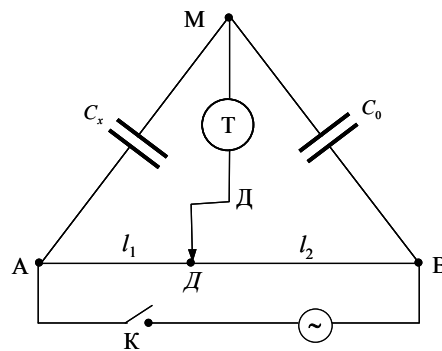


Рис.5

Равновесие моста достигается передвижением контакта “Д” вдоль проволоки реохорда.

Положение контакта “Д”, при котором потенциалы точек  $M$  и  $D$  равны, соответствует равновесию моста. При равновесии моста имеем:

$$\varphi_A - \varphi_M = \varphi_A - \varphi_D \quad (18)$$

$$\varphi_M - \varphi_B = \varphi_D - \varphi_B \quad (19)$$

и таким образом звук в телефоне будет отсутствовать.

Обозначим емкостное сопротивление конденсатора неизвестной емкости через  $R_x = \frac{1}{\omega C_x}$ , а известной емкости через  $R_0 = \frac{1}{\omega C_0}$ . Тогда, согласно закону Ома для

мгновенного значений тока, имеем:

$$\varphi_A - \varphi_M = I \frac{1}{\omega C_x}, \quad \varphi_A - \varphi_D = I\rho \frac{l_1}{S} \quad (20)$$

$$\varphi_M - \varphi_B = I \frac{1}{\omega C_0}, \quad \varphi_D - \varphi_B = I\rho \frac{l_2}{S},$$

где  $l_1$  и  $l_2$  - длины плеч реохорда.

Подставляя выражения для разности потенциалов (20) в формулы (18) и (19), получим расчетную формулу:

$$C_x = C_0 \frac{l_2}{l_1}. \quad (21)$$

Следует обратить внимание на то, что отношение емкостей в формуле (21) будет обратно равно отношению соответствующих длин плеч реохорда, в то время как отношение для сопротивлений в аналогичной формуле будет так сказать, прямым по отношению к соответствующим длинам плеч.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите схему установки (рис. 1).
2. После проверки схемы сначала самим студентом, а затем обязательно преподавателем (лаборантом) включите установку в сеть.
3. Подключите неизвестный конденсатор  $C_{x1}$ .
4. Периодически включая и выключая ключ  $K$  и перемещая движок реохорда, найдите такое его положение, при котором ток через гальванометр будет равен нулю.
5. По шкале реохорда отсчитайте длину плеча  $l_1$  и  $l_2$  запишите в таблицу.
6. Повторите измерения (не меняя  $C_0$ ) 3 раз.
7. Подключите другой конденсатор неизвестной емкости  $C_{x2}$  и выполните действия, указанные в п.п. 4-5
8. Рассчитайте значение неизвестной емкости конденсатора по формуле (6) и вычислите его среднее значение.
9. Соединив  $C_x^1$  и  $C_x^{11}$  последовательно, снова добиться равновесия и значения  $l_1$  и  $l_2$  записать в таблицу.
10. Соединив  $C_x^1$  и  $C_x^{11}$  параллельно, добиться равновесия и определить  $l_1$  и  $l_2$
11. По расчетной формуле (6) подсчитать  $C_x^1$  и  $C_x^{11}$ .

#### 1. Таблица

№	$C_0$	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)	$C_x$	$\Delta C_x$	$\varepsilon$ (%)
1						
2						
3						
Срд.з						

#### 2. Таблица

	№	$C_0$	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)	$C_x$	$\Delta C_x$	$\varepsilon$ (%)
$C_{x\text{после}}$	1						
	2						
	3						
	Срд.з						
$C_{x\text{парал}}$	1						
	2						
	3						
	Срд.з						

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется емкостью и в каких единицах она измеряется?
2. От чего зависит емкость конденсатора? Напишите формулу емкости плоского конденсатора.
3. Что представляет собой конденсатор?
4. В цепь какого тока включается конденсатор?
5. Чему равно емкостное сопротивление?
6. Нарисуйте рабочую схему мостика Уитстона и объясните ее работу.
7. Выведите расчетную формулу для мостика Уитстона.
8. Рассчитайте предложенную преподавателем схему последовательного и параллельного соединения конденсаторов.

## Лабораторная работа № 10

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И МОЩНОСТЬ ЛАМПОЧКИ НАКАЛИВАНИЯ.

**Цель работы:** приобрести умение измерять мощность и сопротивления потребителя электрической энергии по значениям силы тока и напряжения в цепи.

**Приборы и принадлежности:** рабочее поле; ключ; держатель для лампы накаливания; соединительные провода; соединительная секция; лампа накаливания. (дополнительно требуются мультиметр, источник питания)

#### *Теоретическое введение*

В проводниках при определенных условиях может возникнуть непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда. Такое движение называется **электрическим током**. За направление электрического тока принято направление движения положительных свободных зарядов, хотя в большинстве случаев движутся электроны – отрицательно заряженные частицы.

Количественной мерой электрического тока служит сила тока  $I$  – скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $q$ , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени  $t$ , к этому интервалу времени:

$$I = \frac{q}{t}$$

Если ток не постоянный, то для нахождения количества прошедшего через проводник заряда рассчитывают площадь фигуры под графиком зависимости силы тока от времени.

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**. Сила тока измеряется амперметром, который включается в цепь последовательно. В Международной системе единиц СИ сила тока измеряется в амперах [А].  $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$ .

При прохождении тока по проводнику ток испытывает сопротивление со стороны проводника. Причина сопротивления – взаимодействие зарядов с атомами вещества проводника и между собой. Единица измерения сопротивления 1 Ом. **Сопротивление проводника**  $R$  определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

где:  $l$  – длина проводника,  $S$  – площадь его поперечного сечения,  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника (будьте внимательны и не перепутайте последнюю величину с плотностью вещества), которое характеризует способность материала проводника противодействовать прохождению тока. То есть это такая же характеристика вещества, как и многие другие: удельная теплоемкость, плотность, температура плавления и т.д. Единица измерения удельного сопротивления 1 Ом·м. Удельное сопротивление вещества – табличная величина.

Сопротивление проводника зависит и от его температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

где:  $R_0$  – сопротивление проводника при  $0^\circ\text{C}$ ,  $t$  – температура, выраженная в градусах Цельсия,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления. Он равен относительному изменению сопротивления, при увеличении температуры на  $1^\circ\text{C}$ . Для металлов он всегда больше нуля, для электролитов наоборот, всегда меньше нуля.

Немецкий физик Г.Ом в 1826 году экспериментально установил, что сила тока  $I$ , текущего по однородному металлическому проводнику (то есть проводнику, в котором не действуют сторонние силы) сопротивлением  $R$ , пропорциональна напряжению  $U$  на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R}$$

Величину  $R$  принято называть **электрическим сопротивлением**. Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется **резистором**. Это соотношение выражает **закон Ома для однородного участка цепи**: сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

Проводники в электрических цепях можно соединять двумя способами: **последовательно и параллельно**. У каждого способа есть свои закономерности.

### 1. Закономерности последовательного соединения:

$$\begin{aligned} \text{Сила тока: } & I_1 = I_2 = \dots = I \\ \text{Напряжение: } & U = U_1 + U_2 + \dots \\ \text{Сопротивление: } & R = R_1 + R_2 + \dots \end{aligned}$$

Формула для общего сопротивления последовательно соединенных резисторов справедлива для любого числа проводников. Если же в цепь последовательно включено  $n$  одинаковых сопротивлений  $R$ , то общее сопротивление  $R_0$  находится по формуле:

$$R_0 = n \cdot R$$

### 2. Закономерности параллельного соединения:

$$\begin{aligned} \text{Сила тока: } & I = I_1 + I_2 + \dots \\ \text{Напряжение: } & U_1 = U_2 = \dots = U \\ \text{Сопротивление: } & \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \end{aligned}$$

Формула для общего сопротивления параллельно соединенных резисторов справедлива для любого числа проводников. Если же в цепь параллельно включено  $n$  одинаковых сопротивлений  $R$ , то общее сопротивление  $R_0$  находится по формуле:

$$R_0 = \frac{R}{n}$$

**Работа  $A$  электрического тока  $I$** , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением  $R$ , преобразуется в теплоту  $Q$ , выделяющуюся на

проводнике. Эту работу можно рассчитать по одной из формул (с учетом закона Ома все они следуют друг из друга):

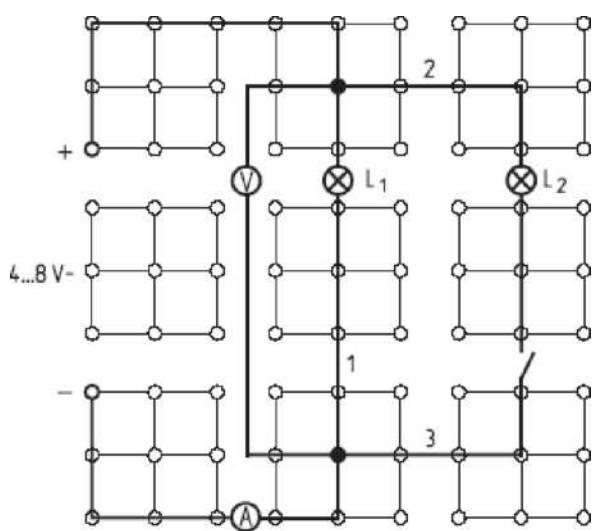
$$Q = A = I^2 R \Delta t = IU \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t$$

Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж.Джоулем и Э.Ленцем и носит название **закона Джоуля–Ленца**. **Мощность электрического тока** равна отношению работы тока  $A$  к интервалу времени  $\Delta t$ , за которое эта работа была совершена, поэтому она может быть рассчитана по следующим формулам:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 R$$

Работа электрического тока в СИ, как обычно, выражается в джоулях (Дж), мощность – в ваттах (Вт).

### Монтаж экспериментальной установки



Работа проводится в несколько этапов: 1 — измерение силы тока и напряжения при включении в цепь одной лампы; 2 — измерение силы тока и напряжения при включении в цепь двух ламп последовательно; 3 — измерение силы тока и напряжения при включении в цепь двух ламп параллельно.

Соедините проводящие сектора с помощью держателей для ламп, ключа и амперметра, так как показано на рисунке. Вставьте лампы в держатели. Затем параллельно лампам присоедините вольтметр. В последнюю очередь присоедините источник питания.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Разомкните ключ. В этом случае лампа 2 будет исключена из рассмотрения. Регулируя напряжение источника питания, добейтесь, чтобы на лампы подавалось 4 В.
2. Замкните ключ, тогда лампы окажутся соединенными параллельно друг другу. Регулируя напряжение источника питания, добейтесь, чтобы на лампы подавалось 4 В.
4. Вместо соединительной секции 1 вставьте лампу 2, а все остальные участки параллельной ветви исключите из цепи. Перед проведением измерений добейтесь, чтобы через лампы протекал ток 0,04 А.
5. В процессе работы в каждом из случаев измерьте силу тока и напряжение на лампах. Занесите их в таблицу.
6. По измеренным значениям силы тока и напряжения рассчитайте сопротивление и мощностью ламп при различных способах включения в цепь.

Способ соединения	№	U (В)	I (А)	R ( $\Omega$ )	P (Вт)
Для одного лампы					
	Ср.З.				
Лампы подключены последовательно					
	Ср.З.				
Лампы подключены параллельно					
	Ср.З.				

Сравните полученные значения с теми, что указаны на цоколе лампы. Сделайте вывод о наиболее эффективном использовании ламп накаливания.

### Контрольные вопросы:

1. Что называется электрическим током?
2. Записать закон Ома в дифференциальной форме.
3. Что называется падением напряжения на участке цепи?
4. Записать обобщенный закон Ома для участка цепи.
5. Как можно измерить работу тока в данной электрической цепи?
6. Зависит ли сопротивление проводника от силы тока в цепи?
7. Когда полная мощность источника тока равна внутренней?
8. Что такое ток короткого замыкания?

## Лабораторная работа № 11

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

**Цель работы:** изучить метод измерения электродвижущей силы и внутреннего сопротивления источника тока, основанный на использовании вольтметра, амперметра и реостата.

**Прибор принадлежности:** рабочее поле; ключ; соединительная секция; соединительные провода; держатель лампы; держатель батарейки; резистор 100 Ом, мультиметр для измерения силы тока и напряжения; источник питания, круглая батарейка 1,5В, R14, лампа накаливания

#### *Теоретическое введение*

Условием движения электрических зарядов в проводнике является наличие в нем электрического поля, которое создается и поддерживается особыми устройствами, получившими название *источников тока*.

Основной величиной, характеризующей источник тока, является его электродвижущая сила. *Электродвижущей силой источника* (сокращенно ЭДС) называется скалярная физическая величина – количественная мера способности источника создавать на его зажимах (полюсах) разность потенциалов. Она равна работе сторонних сил по перемещению заряженной частицы с положительным единичным зарядом от одного полюса источника к другому, т.е.

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}. \quad (1)$$

В СИ ЭДС измеряется в вольтах (В), т.е. в тех же единицах, что и напряжение.

*Сторонние силы источника* – это силы, которые осуществляют разделение зарядов в источнике и тем самым создают на его полюсах разность потенциалов. Эти силы могут иметь различную природу, но только не электрическую (отсюда и название).

Если электрическую цепь разделить на два участка – внешний, с сопротивлением  $R$ , и внутренний, с сопротивлением  $r$ , то ЭДС источника тока окажется равной сумме напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи:

$$\varepsilon = U_r + U_R. \quad (2)$$

По закону Ома напряжение на любом участке цепи определяется величиной протекающего тока и его сопротивлением:

$$U_R = \varepsilon - U_r = \varepsilon - Ir.$$

Так как  $I = \frac{U_R}{R}$ , следовательно

$$\varepsilon = U_R \left( 1 + \frac{r}{R} \right), \quad (3)$$

т.е. напряжение на полюсах источника при замкнутой цепи зависит от соотношения сопротивлений внутреннего и внешнего участков цепи. Если  $r \ll R$ , то  $\varepsilon$  приблизительно равно  $U$ . На этом основано приблизительное определение ЭДС при помощи вольтметра с большим сопротивлением, подключаемого к

полюсам источника. Только в отсутствие тока в источнике его ЭДС будет равна напряжению на полюсах.

К источнику тока с ЭДС  $\xi$  и внутренним сопротивлением  $r$  подключают в качестве внешнего сопротивления реостат и дважды измеряют силу тока и напряжение при различных его сопротивлениях.

Как следует из закона Ома для замкнутой цепи -  $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$  и закона Ома для участка цепи -  $I = \frac{U}{R}$ , при сопротивлении  $R_1$  будет выполняться равенство:

$$\varepsilon = I_1 R_1 + I_1 r = U_1 + I_1 r \quad (1)$$

Аналогично при сопротивлении реостата  $R_2$ :

$$\varepsilon = I_2 R_2 + I_2 r = U_2 + I_2 r \quad (2)$$

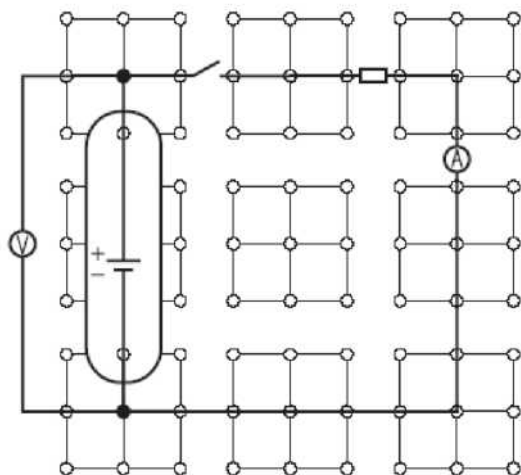
Значения  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1$  и  $U_2$  определяют по показаниям приборов а ходе проведения опыта.

Система двух уравнений (1) и (2) содержит две неизвестных величины  $\varepsilon$  и  $r$ . Решая ее относительно этих неизвестных получают расчетные формулы для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока:

$$\varepsilon = \frac{I_1 U_2 - I_2 U_1}{I_1 - I_2} \quad (3)$$

$$r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2} \quad (4)$$

### Монтаж экспериментальной установки



Соедините проводящие сектора с помощью резистора, ключа и амперметра. Затем параллельно резистору присоедините вольтметр. В последнюю очередь присоедините источник питания, включив в цепь потенциометр, для того, чтобы иметь возможность регулировать напряжение в цепи.

При сборке цепи предусмотрите возможность замены лампы накаливания резистором 100 Ом.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите цепи по схеме, изображенной на рисунке 1.
2. Убедитесь в том, что ползун реостата находится в положении, при котором сопротивление реостата максимально.
3. Включите источник тока, замкните ключ и измерьте силу тока  $I_1$  и напряжение  $U_1$ .
4. Отключите цепь от источника и переведите движок реостата в среднее положение.

5. Еще раз замкните ключ и измерьте силу тока  $I_2$  и напряжение  $U_2$ .
6. Отключите источник тока от электросети и разберите установку.
7. Определите, используя формулы (3) и (4), значения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.
8. Вычислите границы абсолютных погрешностей прямых измерений силы тока и напряжение.
9. Вычислите границы абсолютных погрешностей определения ЭДС и  $r$ .
10. Запишите полученные значения Э.Д.С и  $r$  с учетом погрешностей:

$$\varepsilon_{ист} = \varepsilon \pm \Delta\varepsilon \quad \text{и} \quad r_{ист} = r \pm \Delta r$$

№	I (A)	$\Delta I$ (A)	U (V)	$\Delta U$ (V)	$\varepsilon$ , (V)	$\Delta\varepsilon$ , (V)	r, ( $\Omega$ )	$\Delta r$ , ( $\Omega$ )
1.								
2.								

### Контрольные вопросы

1. Что такое электродвижущая сила и как она измеряется?
2. Что такое напряжение? Какими приборами оно измеряется?
3. Что такое сила тока? Какими приборами она измеряется?
4. Чему равно напряжение на участке цепи, содержащем источник тока?
5. Закон Ома для участка цепи в интегральной и дифференциальной форме.
6. Закон Ома для полной цепи.

## Лабораторная работа № 12

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ Э.Д.С. ЭЛЕМЕНТА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

**Цель работы:** Изучение источников токов и изучение метода компенсационных электрических измерений на примере измерения электродвижущей силы.

**Приборы и принадлежности:** магазин Сопротивлений, нормальный элемент с известной ЭДС, источник тока с неизвестной ЭДС, стенд с электрической схемой, подготовленной для измерения методом компенсации.

#### Теоретическое введение

Компенсационный метод электрических измерений электродвижущих сил, токов и сопротивлений в настоящее время является одним из основных точных методов измерений электродвижущей силы источника.

*Электродвижущая* сила источника тока (ЭДС) есть работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по замкнутому контуру. Пусть источник тока

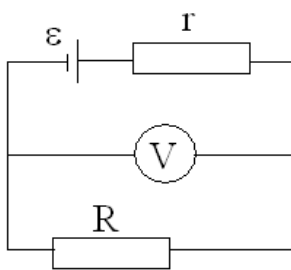


Рис.1

с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$  замкнут на внешнее сопротивление  $R$  (рис. 1). По цепи протекает ток  $I$ . Тогда по закону Ома

$$\varepsilon = IR + Ir. \quad (1)$$

Вольтметр, включённый параллельно источнику тока, измеряет разность потенциалов на клеммах источника, равную падению напряжения на внешнем участке цепи:

$$U = IR. \quad (2)$$

Измеренное напряжение  $U$  отличается от  $\varepsilon$  на величину падения напряжения на внутреннем участке цепи (см. формулы (1) и (2)). Но из (1) следует, что вольтметр покажет значение ЭДС ( $U = \varepsilon$ ), если в момент измерения через источник тока не будет протекать ток ( $I = 0$ ).

Условие равенства нулю тока в момент измерения ЭДС достигается применением метода компенсации.

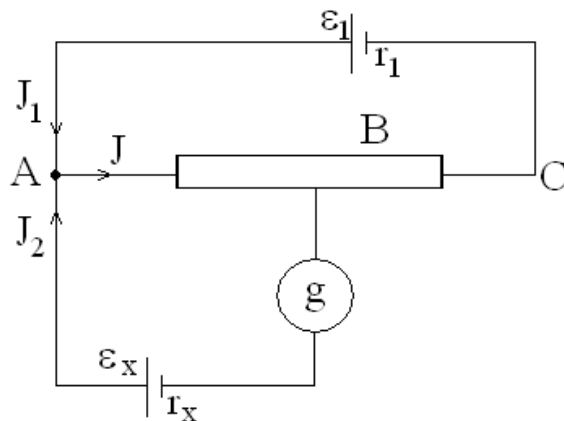


Рис.2

Принципиальная схема измерения электродвижущей силы неизвестного элемента компенсационным методом представлена на рис. 2, где  $g$  – чувствительный гальванометр для фиксации тока через исследуемый источник тока;  $AB$  – реохорд с подвижным контактом  $D$  (полное сопротивление  $R$  участка

цепи  $AB$  остаётся постоянным:  $R = R_1 + R_2$ ); направление токов показано стрелками. Ток  $I_2$  через гальванометр может иметь разное направление в зависимости от соотношения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .

*Принцип метода* состоит в том, что два элемента различных ЭДС  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_x$  включают полюсами навстречу друг другу и добиваются исчезновения тока  $I_2$  через исследуемый элемент  $\varepsilon_x$  ( $\varepsilon_x$  должна быть меньше  $\varepsilon_1$ , поэтому в качестве элемента  $\varepsilon_1$  часто используют батарею аккумуляторов). Для общего случая, показанного на рис. 2, по первому закону Кирхгофа для узла  $A$  имеем

$$\sum I = 0,$$

$$I = I_1 + I_2. \quad (3)$$

Применяя второй закон Кирхгофа к контурам  $\varepsilon_1 ADB$  (обход по часовой стрелке) и  $A\varepsilon_x D$  (обход против часовой стрелки), получим уравнения

$$\varepsilon_1 = IR_2 + I_1(r_1 + R_1); \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = IR_2 + I_2(r_x + r_g), \quad (5)$$

где  $I_1$  – ток в цепи аккумулятора  $\varepsilon_1$ ,  $I_2$  – ток в цепи элемента  $\varepsilon_x$ ,  $I$  – ток на участке  $AD$ ,  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивления участков цепи  $AD$  и  $DB$ ,  $r_g$  – сопротивление гальванометра,  $r_1$  и  $r_x$  – внутренние сопротивления аккумулятора и исследуемого элемента.

Подбирая величину сопротивления  $R_2 = R_x$ , можно добиться исчезновения тока в цепи гальванометра ( $I_2 = 0$ ). Тогда уравнения (3), (4) и (5) принимают вид

$$I = I_1; \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = IR_x + I_1(r_1 + R_1); \quad (7)$$

$$\varepsilon_x = IR_x. \quad (8)$$

Сравнивая формулы (6) – (8), получим

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1 R_x}{r_1 + R}. \quad (9)$$

Отсутствие тока в цепи гальванометра показывает, что электродвижущая сила элемента  $\varepsilon_x$ , целиком уравновешивается или компенсируется падением потенциала между точками  $A$  и  $D$ , то есть при отсутствии тока в цепи гальванометра разность потенциалов между точками  $A$  и  $D$  равна электродвижущей силе искомого элемента  $\varepsilon_x$ .

Если вместо  $\varepsilon_x$  в ту же схему подключить источник тока с известной ЭДС  $\varepsilon_n$  («нормальный» источник тока), тогда формула (9) примет вид

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_1 R_n}{r_1 + R}. \quad (10)$$

Поделив формулу (8) и (9), получим

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_n} = \frac{R_x}{R_n},$$

откуда

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \cdot \frac{R_x}{R_n}, \quad (11)$$

где  $R_x$  – сопротивление участка цепи при включении элемента  $\varepsilon_x$ ,  $R_n$  – сопротивление участка цепи при включении элемента  $\varepsilon_n$ .

Таким образом, измерение ЭДС неизвестного элемента  $\varepsilon_x$  сводится к подбору и измерению сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  участка  $DB$ , получаемых при  $I_2 = 0$ . В качестве

«нормального» элемента обычно употребляется ртутнокадмиевый элемент, ЭДС которого практически не меняется со временем ( $\varepsilon_n = 1,018$  В при температуре  $20^\circ\text{C}$ ) и мало зависит от температуры.

Методом компенсации может быть *измерено значение напряжения* на каком-то участке произвольной электрической цепи. Для этого в схеме (рис. 2) вместо ЭДС  $\varepsilon_x$  включается исследуемый участок и производится компенсация тока через него. Тогда напряжение на исследуемом участке можно рассчитать (согласно (11)) по формуле

Методом компенсации может быть *измерена сила тока* в исследуемой электрической цепи. Для этого вместо  $\varepsilon_x$  в схеме (рис. 2) подсоединяют участок этой цепи, сопротивление  $R_{\text{пер}}$  которого известно. Методом компенсации измеряют падение напряжения  $U$  на  $R_{\text{пер}}$  описанным выше способом. А затем по закону Ома рассчитывается сила тока

Методом компенсации может быть *измерено сопротивление* неизвестной величины. Для этого сначала на этом сопротивлении измеряется падение напряжения  $U$ . При известной силе тока  $I$  через сопротивление по закону Ома рассчитывается величина неизвестного сопротивления

Таким образом, методом компенсации можно с высокой точностью измерить ЭДС источника тока, падение напряжения, силу тока и сопротивление.

*Преимущества метода компенсации* заключаются в следующем:

1. Сила тока через источники тока, ЭДС которых сравниваются, близка к нулю (определяется чувствительностью гальванометра). Поэтому практически равны нулю падение напряжения внутри элемента, снижающего значение ЭДС, а также падения напряжения в проводах.
2. Гальванометр в измерительной цепи работает как нулевой прибор, и градуировка его шкалы на результат изменений не влияет. Сопротивления, входящие в расчетные формулы (11) – (14), могут быть в настоящее время измерены с точностью до сотых долей процента.
3. ЭДС вспомогательной батареи  $\varepsilon_1$  не входит в формулу для расчёта, т.е. её значение знать точно необязательно. Необходимо только, чтобы её значение в процессе измерения было постоянным и превышало ЭДС сравниваемых элементов.

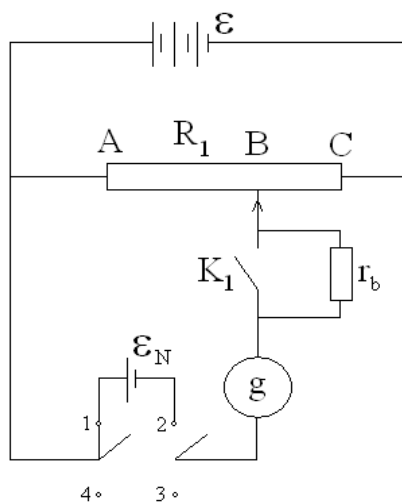


Рис.3

$K_1$  – однополюсный ключ, выполненный в виде кнопки, служащий для замыкания накоротко сопротивления  $r_b$  при точной компенсации;  $\Pi$  – двухполюсный

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Принципиальная схема измерительной установки приведена на рис. 3, где  $\varepsilon$  – вспомогательная батарея;  $ABC$  – потенциометр или реохорд, конструкция которого позволяет изменять сопротивление участка  $AB$  при компенсации (полное сопротивление участка  $ABC$  постоянно);  $\varepsilon_n$  – нормальный элемент;  $g$  – нулевой гальванометр;  $r_b$  – сопротивление, служащее для ограничения тока через

гальванометр при предварительной компенсации;

переключатель, служащий для поочерёдного подключения в измерительную схему  $\varepsilon_n$  (положение I) или исследуемого участка цепи (положение II).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить исследуемую  $\varepsilon_x$  к клеммам переключателя П.
2. С помощью переключателя П подсоединим  $\varepsilon_x$  в электрическую схему, поставив его в положение I.
3. Подбирая величину сопротивления участка  $AD$ , добиться равенства нулю тока на гальванометре сначала грубо, не замыкая кнопку  $K$ , а затем точно, нажав эту кнопку. Записать значения сопротивления  $R_x$  в табл. 1. Повторить измерения три раза.
4. Переключатель П поставить в положение II, подключая в электрическую схему «нормальный» элемент  $\varepsilon_n$ .
5. Подобрать величину сопротивления участка  $AD$  такой, чтобы ток через гальванометр и, следовательно, через «нормальный» элемент не протекал. Записать значение сопротивления  $R_n$  в табл. 1. Измерения провести три раза.
6. Рассчитать по формуле ЭДС неизвестного элемента:
7. Занести данные измерений и вычислений в таблицу 1.

*Таблица 1*

№	$R_x$ , Ом	$\Delta R_x$ , Ом	$R_x$ Ом ср,	$R_n$ , Ом	$\Delta R_n$ , Ом	$R_n$ Ом ср,	$\varepsilon_x$ , В
1							
2							
3							

### Контрольные вопросы:

1. Что такое ЭДС источника тока?
2. Записать и сформулировать закон Ома в интегральной форме для участка цепи и замкнутого контура.
3. Записать и сформулировать правила Кирхгофа.
4. Объяснять сущность метода компенсации на примере работы принципиальной схемы.
5. Какими преимуществами обладает метод компенсации?
6. Как измерить ЭДС неизвестного источника компенсационным способом?

## Лабораторная работа № 13

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

**Цель работы:** Изучение принципа работы измерительной мостовой схемы. Определение неизвестного сопротивления с помощью мостика Уитстона; проверка закона параллельного и последовательного соединения сопротивлений; определение удельного сопротивления проводника.

**Приборы и принадлежности:** реохорд, набор резисторов с неизвестными (в проволочном виде) и известными сопротивлениями, цифровой мультиметр, источник постоянного тока, мост Уитстона.

#### Теоретическое введение

В технике измерений *электрическим мостом* называют электрический прибор для измерения сопротивлений, емкостей, индуктивностей и других электрических величин, представляющих собой измерительную мостовую цепь, действие которой основано на методике сравнения измеряемой величины с образцовой мерой. Мостовые схемы используют индикатор баланса для сравнения двух напряжений, точно так же как и лабораторные весы сравнивают две массы и указывают на то, что они равны. В отличие от «потенциометрических» схем, используемых для простого измерения неизвестного напряжения, мостовые схемы могут использоваться для измерения всех видов электрических величин, в том числе и сопротивлений с высокой точностью.

Стандартная мостовая схема, часто называемая *мостом Уитстона* (Wheatstone bridge), изображена на рис. 1.

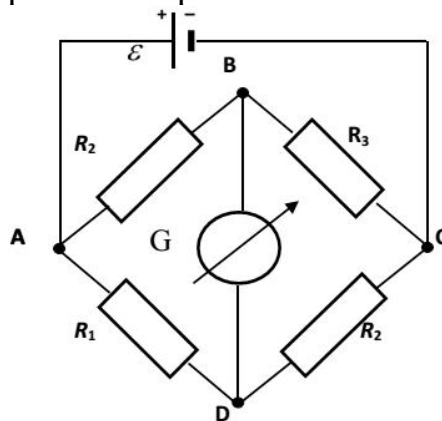


Рис. 1. Мост Уитстона

Классическая мостовая цепь состоит из четырех сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , соединенных последовательно в виде четырехугольника (рис. 1), причем точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  называют вершинами. Ветвь  $AC$ , содержащая источник питания  $U_n$ , называется диагональю питания, а ветвь  $BD$ , содержащая сопротивление нагрузки  $R_H$ , - диагональю нагрузки. Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , включенные между двумя соседними вершинами, называются *плечами мостовой цепи*.

Название «мостовая цепь» объясняется тем, что диагонали, как мостики,

соединяют две противоположащие вершины (диагональ нагрузки, например, ранее так и называлась - мост). Схема, представленная на рис. 1, известна в литературе как четырехплечный мост, или мост Уитстона. В данной лабораторной работе используется одна из разновидностей моста Уитстона, которая позволяет проводить измерения величин активных сопротивлений.

Мосты Уитстона считаются превосходным средством измерения сопротивления среди схем различных омметров. В отличие от нелинейных схем, имеющих нелинейные шкалы, и связанные с этим погрешности измерений, мостовая схема является линейной и довольно точной. Математика описания её работы основана на простых отношениях и пропорциях.

Имея стандартные сопротивления достаточной точности и нуль-детектор с необходимой чувствительностью, достижимая точность измерения сопротивления может быть не хуже  $\pm 0,05$  % при использовании моста Уитстона. Это метод измерения сопротивления предпочитают использовать в калибровочных лабораториях из-за его высокой точности.

Существует много вариаций основной схемы моста Уитстона. Большинство мостов постоянного тока используются для измерения сопротивления, в то время как мосты переменного тока могут быть использованы для измерения различных электрических величин, таких как индуктивность, ёмкость и частота.

Так, например, мост Уитстона используется для определения изменения сопротивления тензорезистора (тензодатчика), «измеряющего» изменение давления, температуры, распределение деформаций (изгиб или сжатие-растяжение) в конструктивных элементах зданий, сооружений, в сводах подземных выработок и многое другое. Причем, из-за высокой чувствительности мостика к дисбалансировке, тензочувствительность датчиков также высока, что способствует измерению даже микродислокаций (микродавлений и т.п.) в исследуемом объекте.

Основной электрической характеристикой проводника является его *сопротивление*. Сопротивление представляет собой меру противодействия установлению в проводнике электрического тока. Зависит сопротивление проводника от его геометрии и электрических свойств его материала. Проводник длиной  $l$  с постоянным сечением  $S$  обладает сопротивлением  $R$ :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  - зависящая от материала проводника и его состояния величина, называемая *удельным сопротивлением*.

В настоящей работе для измерения сопротивлений использован *линейный мост Уитстона*. Электрическая схема моста представлена на рис. 2. В мост включены: известное сопротивление  $R_m$ , неизвестное сопротивление  $R_x$ , реохорд или аналогичная система, имеющая однородный участок  $AC$  с постоянным по всей длине удельным сопротивлением.

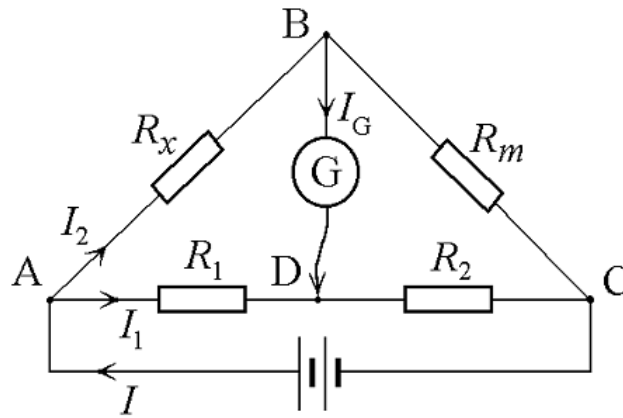


Рис. 2. Линейный мост Уитстона

При произвольных значениях сопротивлений через гальванометр  $G$  будет течь ток того или иного направления. Однако сопротивления можно подобрать таким образом, что ток в гальванометре ответвляться не будет ( $I_g = 0$ ). В этом случае потенциалы точек  $B$  и  $D$  будут равны ( $\varphi_B = \varphi_D$ ). Такое состояние называют *равновесием моста*.

Установим зависимость, которая существует между сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_m$ ,  $R_x$  в этот момент.

По первому правилу Кирхгофа  $\sum_i I_i = 0$  в точке  $B$  и  $D$  сумма токов равна нулю, т.е.

при условии  $I_g = 0$  получаем равенство токов:

$$I_{AB} = I_{BC} \quad \text{и} \quad I_{AD} = I_{DC} \quad (2)$$

По второму правилу Кирхгофа  $\sum_i I_i R_i = \sum_i \varepsilon_i$  для контуров  $ABDA$  и

$BCDB$  можно записать:  $I_{AD} \cdot R_1 = I_{AB} \cdot R_x$

$$I_{CD} \cdot R_2 = I_{BC} \cdot R_m \quad (3)$$

Из последних уравнений вытекает соотношение  $R_x = R_m \cdot \frac{R_1}{R_2}$  (4)

Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  для линейной схемы моста Уитстона лежат на одной прямой  $AC$ , называемой реохордом, и представляют собой однородную проволоку (струну), по которой на скользящем контакте перемещается движок  $D$ , соединенный с гальванометром  $G$ . Вследствие того, что проволока реохорда однородна и тщательно откалибрована (имеет везде одинаковое поперечное сечение), отношение сопротивлений участков цепи  $AD$  (сопротивление  $R_1$ ) и  $DC$  (сопротивление  $R_2$ ) можно заменить отношением соответствующих длин плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  (на основании прямо пропорциональной зависимости  $R(l) = \rho \frac{l}{S}$ ):

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

Тогда окончательная формула для определения искомого сопротивления имеет

$$\text{вид:} \quad R_x = R_m \cdot \frac{l_1}{l_2} \quad (5)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

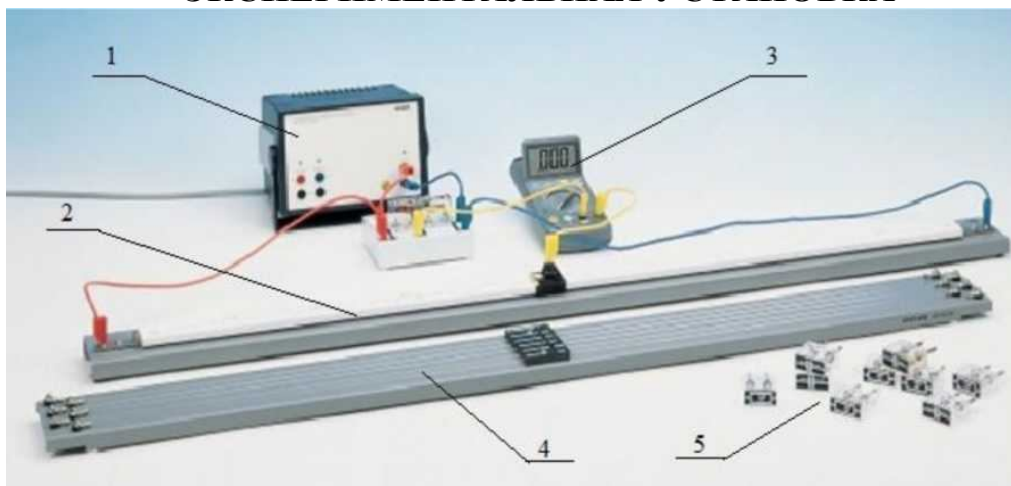


Рис. 3. Экспериментальная установка. 1 - источник постоянного тока, 2 - реохорд, 3 - цифровой мультиметр, 4 - проводник с неизвестным сопротивлением, 5 - набор проводников с известным сопротивлением

Ветвь мостика Уитстона  $ADC$  изготавливается из однородной металлической проволоки (струны) длиной 1 метр, имеющей всюду одинаковое поперечное сечение. Струна натягивается на миллиметровую шкалу (такую струну часто называют реохордом), вдоль струны скользит движок  $D$ , соединенный с мультиметром. Типы струн приведены в таблице 1.

В качестве гальванометра используется мультиметр, который можно включить как в режим амперметра, так и в режим вольтметра.

Таблица 1

### Перечень используемых струн

№ струны	Материал	Диаметр, мм
1	Константан (CuNi44)	1
2	Константан (CuNi44)	0,5
3	Константан (CuNi44)	0,7
4	Константан (CuNi44)	0,7
5	Константан (CuNi44)	0,35
6	Латунь (CuZn37)	0,5

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 1. Определение неизвестного сопротивления

1. Соберите схему, изображенную на рис. 2. В качестве неизвестного сопротивления  $R_x$  выберите произвольную струну из таблицы 1 (по указанию преподавателя). Резисторы с известным сопротивлением  $R_m$  в количестве 3-4 подбираются произвольно (предпочтительно использовать резисторы с сопротивлениями 1 Ом, 2 Ом, 5 Ом и 10 Ом).
2. Включите источник тока. Передвигая подвижный контакт реохорда, найдите точку равновесия путем поиска нулевых показаний гальванометра (используйте

мультиметр в режиме вольтметра с диапазоном 20 V). Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$R_m$ Ом	$l_1,$ м	$l_2$ м	$R_x$ Ом	$R_{xcp}$ Ом
1				
2				
5				
10				

3. Рассчитайте значение неизвестного сопротивления по формуле (5) и вычислите его среднее значение.
4. Рассчитайте погрешность косвенных измерений  $\Delta R$ . Результаты запишите в отчет в виде:  $R = R \pm \Delta R$ .

$x$

## УПРАЖНЕНИЕ 2. Определение удельного сопротивления материала

### проволоки

1. Проведите измерения сопротивления  $R_x$  для 4-х струн разного диаметра (№ 1, 2, 3, 5) с использованием не менее трех резисторов с известными сопротивлениями  $R$ .
2. Результаты измерений занесите в таблицу 3, рассчитайте для каждого неизвестного сопротивления (по формуле 5) его среднее значение.

№ струны	$R_m$ Ом	$l_1,$ м	$l_2$ м	$d,$ м	$\frac{1}{d^2}$ $м^{-2}$	$R_x$ Ом	$R_{xcp}$ Ом
1							

3. По полученным результатам постройте график зависимости сопротивления проволоки от ее диаметра  $R_x = f(\frac{1}{d^2})$ . Пользуясь формулой (6), по угловому коэффициенту построенной прямой  $tg\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta(\frac{1}{d^2})}$  определите удельное

сопротивление материала проволоки.  $\rho = tg\alpha \frac{\pi}{4l}$  (6)

4. Определите тип материала по сравнению полученного значения удельного сопротивления проволоки со справочными данными.

### УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Соедините последовательно два неизвестных сопротивления (произвольные проводники № 1-5) и включите их в цепь как плечо  $AB$ . Измерьте общее сопротивление  $R_{x\text{после}}$  для различных значений известного сопротивления. Результаты изменений внесите в таблицу 4.

2. Соедините параллельно два неизвестных сопротивления (произвольные проводники № 1-5) и включите их в цепь как плечо  $AB$ . Измерьте общее сопротивление  $R_{x\text{парал}}$  для различных значений известного сопротивления. Результаты изменений внесите в таблицу 4.

	$R_m$ Ом	$l_1,$ м	$l_2$ м	$R_x$ Ом	$R_{x\text{ср}}$ Ом
$R_{x\text{после}}$					
$R_{x\text{парал}}$					

. Рассчитайте среднее значение  $R_{x\text{после}}$  и  $R_{x\text{парал}}$ . Проверьте выполнение закона параллельного и последовательного соединения проводников.

#### Контрольные вопросы:

1. Как формулируются законы Кирхгофа?
2. Получите формулу, определяющую сопротивление последовательно и параллельно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .
3. Что понимают под удельным сопротивлением? Удельной проводимостью?
4. В каких единицах измеряют удельное сопротивление? Проводимость?
5. Как определить сопротивление проводника, выполненного в виде трубки?
6. Рассчитайте сопротивление проводника, выполненного в виде трубки с отверстиями. Предложите оптимальную методику расчета.
7. Как рассчитать сопротивление проводника, имеющего переменное сечение? Задайте закон изменения площади сечения проводника и предложите формулу для его расчета.

## ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

**Цель работы:** исследование тока термоэлектронной эмиссии двухэлектродной вакуумной лампы – диода определение работы выхода электронов из металлического катода.

**Приборы и принадлежности:** стенд для исследования термоэлектронной эмиссии, магазин сопротивлений.

### Теоретическое введение

В металлических кристаллах внешние валентные электроны образуют свободный электронный газ, а в узлах кристаллической решетки металла находятся положительно заряженные ионы. Свободные электроны удерживаются внутри металла. Это означает, что на границе металл – вакуум существует потенциальный барьер, препятствующий электронам покидать металл. Минимальная энергия, которую нужно затратить для удаления электрона из твердого тела в вакуум при температуре абсолютного нуля, называется работой выхода. Причина существования работы выхода заключается в следующем.

Состояние свободных электронов в металле описывается квантовой статистикой Ферми-Дирака, согласно которой распределение электронов по энергиям имеет вид

$$\langle N(E) \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (1)$$

где  $\langle N(E) \rangle$  – среднее число электронов в квантовом состоянии с энергией  $E$ ;  $E_F$  – энергия Ферми – это максимальная энергия, которую могут иметь электроны проводимости в металле при 0°K (соответствующий энергетический уровень называется уровнем Ферми);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

На рис. 1 показано соответствующее распределение свободных электронов в металле по энергиям или абсолютному нулю и при температуре, отличной от нуля. При абсолютном нуле температур функция распределения Ферми-Дирака равна единице для  $E < E_F$ , это означает, что при абсолютном нуле свободные электроны в металле занимают все энергетические уровни вплоть до уровня Ферми. Уровни, энергия которых выше энергии Ферми  $E > E_F$ , остаются свободными, здесь функция распределения равна нулю. При  $T > 0$  незначительная доля электронов вблизи уровня Ферми (с энергией, отличающейся на  $kT$  от энергии Ферми) подвергается тепловому возбуждению и переходит на уровни с энергией больше энергии Ферми. Таким образом, вследствие распределения электронов по энергиям некоторые электроны, которые находятся на «хвосте» функции распределения, обладают достаточно высокой энергией и могут покинуть металл, при этом в металле остается избыточный положительный заряд. Электроны, покинувшие металл, образуют вблизи его поверхности «электронное облако». Создается двойной электрический слой толщиной порядка нескольких межатомных расстояний ( $\sim 10^{-9}$

м) с разностью потенциалов  $\Delta\phi$ , которая называется поверхностным скачком потенциала и зависит от работы выхода  $A$ :

$$\Delta\phi = A/e \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона.

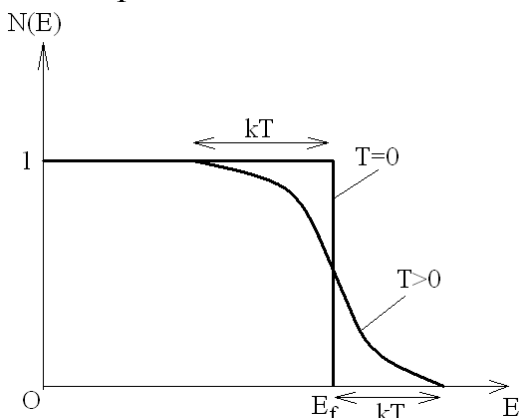


Рис. 1. Распределение свободных электронов по энергиям в металле при  $T = 0$  и  $T > 0$

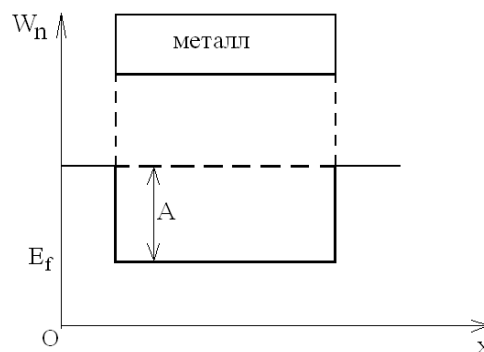


Рис. 2. Потенциальный барьер для электронов на границе металл – вакуум

Можно считать, что объем металла представляет для электронов проводимости «потенциальную яму» (рис. 2). Работа выхода  $A$  отсчитывается не от дна «потенциальной ямы», а от уровня Ферми, т.е. от верхнего из занятых электронами энергетических уровней. Работа выхода зависит от химической природы металла и от чистоты поверхности. Подбирая соответствующее покрытие поверхности, можно изменять работу выхода.

Явления испускания электронов металлами называются эмиссионными. Покинуть металл могут только те электроны, кинетическая энергия которых превышает работу выхода. В зависимости от источника энергия различают термоэлектронную (испускание электронов при нагревании), фотоэлектронную (при освещении), вторичную электронную (при бомбардировке электронами) и автоэлектронную (под действием внешних электрических полей) эмиссии.

Явление термоэлектронной эмиссии используется для получения тока электронов в вакууме, например, в электронных лампах, электроннолучевых трубках, электронных микроскопах.

Теоретическое значение термоэмиссионного тока, полученное на основе квантовой статистики Ферми-Дирака, сильно зависит от работы выхода и температуры (формула Ричардсона-Дэшмана)

$$I = BST^2 e^{-A/kT}$$

где  $B$  – эмиссионная постоянная, одинаковая для всех металлов;  $S$  – площадь поверхности металла.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии проводится с помощью двухэлектродной лампы – вакуумного диода с вольфрамовым катодом прямого накала. Схема установки приведена на рис. 3.

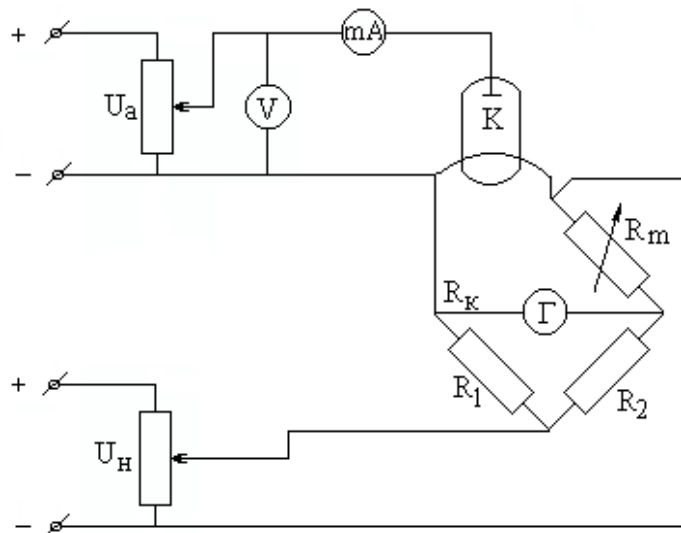


Рис. 3. Схема установки

Вакуумный диод представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух, с двумя электродами: анодом в форме цилиндра А и вольфрамовым катодом К, выполненным в виде тонкой проволоки, проходящей по оси цилиндра. Катод нагревается электрическим током, величина которого может изменяться с помощью потенциометра, регулирующего напряжение на катоде  $U_n$ . Для определения температуры катода измеряют его сопротивление и используют линейный характер зависимости сопротивления металла от температуры

$$R_k = R_0 \alpha T \quad (4)$$

где  $R_0$  – сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha \approx 1/273 \text{ K}^{-1}$  – температурный коэффициент сопротивления. Из (4) рассчитывают температуру катода. Сопротивление  $R_k$  измеряется мостовым методом. Плечи моста состоят из резисторов с известными сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , магазина сопротивлений  $R_m$  и катода  $R_k$ . В диагонали моста включены гальванометр Г и источник постоянного напряжения  $U_n$ . Подбором сопротивления моста  $R_k$  добиваются равенства нулю тока, протекающего через гальванометр, то есть приводят мост в равновесие. Из условия равновесия моста  $R_k/R_m = R_1/R_2$  определяют сопротивление катода

$$R_k = R_m(R_1/R_2) \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует формула для расчета температуры катода  $T = \frac{R_m R_1}{\alpha R_0 R_2}$

(6)

Величины  $R_1$ ,  $R_2$  и  $1/\alpha R_0$  определены заранее и приведены в настольном варианте.

Ток термоэлектронной эмиссии измеряется непосредственно миллиамперметром mA, напряжение  $U_a$  между анодом А и катодом К регулируется потенциометром и измеряется вольтметром V (рис. 3).

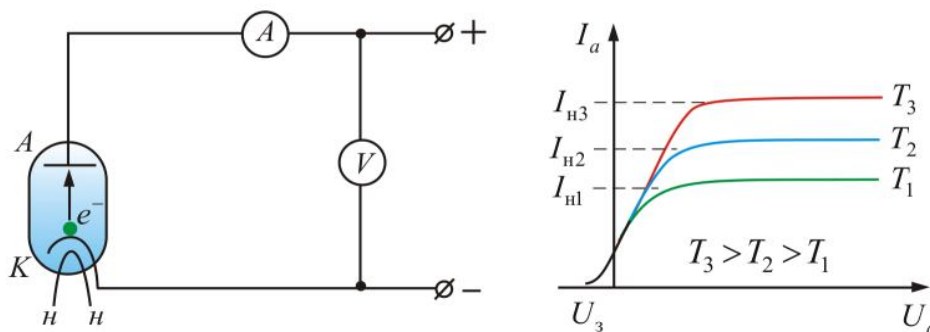


Рис.4. Вольтамперная характеристика вакуумного диода для трех различных значений температуры катода  $T_1 > T_2 > T_3$

Зависимость величины анодного тока  $I_a$  от величины анодного напряжения  $U_a$  называется вольтамперной характеристикой двухэлектродной лампы. При этом температура катода должна оставаться постоянной. Вид этой характеристики приведен на рис. 4 для трех различных температур катода.

Вольтамперная характеристика диода не является линейной, на ней выделяются два участка.

1. В области малых значений анодного напряжения зависимость подчиняется закону трех вторых Богуславского – Ленгмюра

$$I = CU^{3/2}$$

где  $C$  – коэффициент, зависящий от площади поверхности катода и геометрии лампы.

2. При увеличении напряжения рост тока прекращается, достигая значения тока насыщения  $I_{нас}$ . Это означает, что все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. Величина тока насыщения зависит от температуры в соответствии с теоретической зависимостью Ричардсона-Дэшмана (3). Формула (3) позволяет определить работу выхода электрона из металла. Для этого нужно при двух различных температурах  $T_1$  и  $T_2$  измерить токи насыщения  $I_{нас1}$  и  $I_{нас2}$ . Согласно (3)

$$I_{нас1} = BST_1^2 \exp(-A/kT_1),$$

$$I_{нас2} = BST_2^2 \exp(-A/kT_2).$$

Разделив почленно первое равенство на второе и прологарифмировав, получим

$$A = \frac{kT_1T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{I_{нас1}T_2^2}{I_{нас2}T_1^2},$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

В данной работе это соотношение используется для определения работы выхода из материала катода – вольфрама.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Задание 1. Получение вольтамперной характеристики диода

1. Внимательно изучите рабочую схему и лицевую панель прибора. Проверьте подключение магазина сопротивлений  $R_m$ , установите на нем значение  $R_m$ , указанное преподавателем.
2. Включите прибор и дайте ему прогреться в течение 2 мин.
3. Установите по вольтметру напряжение на аноде  $U_a = 150$  В. Регулируя напряжение накала  $U_n$ , получите значение анодного тока  $I_a$  в пределах от 20 до 25 мА (по указанию преподавателя).

- Регулируя  $R_M$ , добейтесь баланса моста по показанию гальванометра (при равновесии моста ток через гальванометр должен быть равен нулю). Значение  $R_M$  запишите в таблицу. Вычислите сопротивление и температуру  $T_1$  катода (см. задание 2, п. 1).
- Снимите вольтамперную характеристику. Для этого при постоянной температуре катода произведите измерения анодного тока при различных напряжениях на аноде. Данные запишите в таблицу.

Таблица 1 (2, 3)

$R_M, \text{ Ом}$		$R_{k1}, \text{ Ом}$					$T_1, \text{ К}$			
$U_a, \text{ В}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$I_a, \text{ mA}$										
$U_a, \text{ В}$	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180
$I_a, \text{ mA}$										

- Проведите аналогичные измерения при двух других значениях температуры катода  $T_2$  и  $T_3$  (значения тока насыщения)  $I_{\text{нас}1}$ ,  $I_{\text{нас}2}$ ,  $I_{\text{нас}3}$  задаются преподавателем).
- На одном чертеже постройте вольтамперные характеристики  $I_a(U_a)$  для всех значений температуры катода.

### Задание 2. Определение работы выхода

- По формуле  $R_k = R_M(R_1/R_2)$  вычислите значения сопротивления катода  $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$ ,  $R_{k3}$  и по формуле  $T = R_k(1/\alpha R_0)$  вычислите значения температуры катода  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  для всех трех опытов. Данные занесите в таблицы 1, 2, 3.
- Вычислите работу выхода электрона  $A$  по формуле (8), попарно комбинируя значения абсолютной температуры и тока насыщения.

Формула записана для значений  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $I_{\text{нас}1}$ ,  $I_{\text{нас}2}$ , аналогично вычисляется работа выхода для комбинаций  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_1$ ,  $T_3$ . Выразите значение  $A$  в электронвольтах ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

- Вычислите среднее арифметическое значение и среднеквадратическое отклонение работы:  $A_{\text{cp}} = \left( \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \right)$ ;  $\Delta A_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\sum (A_i - A_{\text{cp}})^2}{n(n-1)}}$ .

Определите по таблице Стьюдента коэффициент Стьюдента  $\alpha$  при  $n = 3$  и  $W = 0,95$  и определите случайную погрешность по формуле Стьюдента

$$\Delta A = \alpha \Delta A_{\text{кв}}$$

- Запишите окончательный результат в виде  $A = (A_{\text{cp}} \pm \Delta A) \text{ эВ}$ .

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

В работе используются электрические приборы, питающиеся от сети напряжением 220 В, при работе с которыми необходимо соблюдать правила техники безопасности для работы с электрическими приборами. Включать установку можно только в присутствии преподавателя после получения допуска к работе. Нельзя открывать схему прибора. При обнаружении неисправности выключите установку и обратитесь к преподавателю или лаборанту. После выполнения лабораторной работы не забудьте выключить установку.

### **Контрольные вопросы:**

1. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии? для чего применяется явление термоэлектронной эмиссии? Какими еще причинами могут быть вызваны эмиссионные явления?
2. Работа выхода электрона из металла. Поверхностный скачок потенциала.
3. Вольтамперная характеристика двухэлектродной лампы. Закон Богуславского-Ленгмюра.
4. Что такое ток насыщения? Почему ток насыщения зависит от температуры? Формула Ричардсона-Дэшмана. Как зависит ток насыщения от работы выхода?
5. Как производится измерение и регулирование температуры катода?
6. Как вычисляется работа выхода электрона из металла в данной работе? Получите рабочую формулу для этой величины.
7. Устройство двухэлектродной лампы. Применение двухэлектродной лампы.

## Основные и дополнительные подразделения в международной системе (СИ)

№	Единица	Единица измерения			
		Размер	Имя	Символ	Определение
<b>Основные единицы</b>					
1.	Длина	L	Метр	м	Длина излучения в вакууме, превышающая 1650763, в 73 раза больше длины вакуума, составляет 1 метр, как переход между атомами $2P_{10}$ и $5d_5$ атома Криптона 86.
2.	Масса	m	Килограмм	кг	Масса цилиндров из сплава платины (90%) и иридия (10%) с диаметром и высотой 39 мм.
3.	Время	t	Секунд	с	9192631770 раз фаза излучения, соответствующая переходу между двумя поверхностными уровнями атомного состояния цезия 133, принимается за 1 секунду.
4.	Сила тока	I	Ампер	А	1 ампер - Два расстояния, параллельные 1 м друг от друга в вакууме, каждая длина метра $2 \times 10^{-7}$ Н является эквивалентом мощности постоянного тока, создаваемой силой.
5.	Термодинамический температура	T	Кельвин	К	Термодинамическая температура 1 / 273,16, которая описывает точку воды, считается 1 Кельвином.
6.	Количество вещества	$\nu$	Моль	Мол	Количество вещества в системе, состоящее из структурного элемента (атома, молекулы или других частиц), равное числу атомов в массе 0,12 кг углерода-12, считается 1 моль.
7.	Сила цветов	J	Кандела	Кд	Мощность света источника света, излучающего монохроматическое излучение $540 \times 10^{12}$ Гц, имеет световую мощность в направлении 1 Вт / 683 Сг в качестве свечи (свечи).
<b>Дополнительные единицы</b>					
8.	Плоский угол		Радан	Рад	Угол между двумя радиусами дуги, равный радиусу окружности, принимается за 1 радиан. (1 рад = $57^\circ 17' 44.8''$ ).
9.	Телесный угол		Стерadian	Ср	Космический угол, который расположен в центре центра шара и отделяет поверхность от поверхности сферы до квадрата сферы, считается 1 стерадиан.

## Таблицы физических величин

<b>Основные физические постоянные.</b>	
Скорость света в вакууме	$c=2,997925 \cdot 10^8 \cdot c^{-1}(1,3 \cdot 10^{-6})$
Постоянная Планка	$\hbar = 6,5819 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot c = 1,05449 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c$
Постоянная Больцмана	$k=1,38047 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1} (3,6 \cdot 10^{-5}),$ $k=8,6171 \cdot 10^{-11} \text{ MeV} \cdot \text{град}^{-1}.$
Число Авогадро: Физическая шкала (число атомов в 16 г $O^{16}$ )	$N=6,02497 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} (4,7 \cdot 10^{-5}).$
Химическая шкала (число атомов в 16 г $O^{16}$ )	$N=6,02252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} (4 \cdot 10^{-5}).$
Атомная единица массы - а.е.м.: Физическая шкала	$1 \text{ аем} = 1/N_{\text{физ}} = 1,65967 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 931,147 \text{ MeV}$ $(2,3 \cdot 10^{-5}).$
Газовая постоянная: Физическая шкала	$R=8,31695 \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} (2,7 \cdot 10^{-5})$
Химическая шкала	$R=8,31466 \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Нормальная атмосфера	$P=10^5 \text{ Па}$
Постоянная закона Стефана-Больцмана	$\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная закона смещения Вина	$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-2}$
Гравитационная постоянная Число Фарадея	$F=96521 \text{ Кл} \cdot \text{г} \cdot \text{эквив}^{-1}.$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda = 2,42621 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = 7,2972 \cdot 10^{-3}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27276 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Т}^{-1}$
Ядерная магнетон	$\mu_n = 5,0502 \cdot 10^{-27} \text{ Дж}$
Масса электрона	$m_e = 9,1083 \cdot 10^{-28} \text{ г}$
Заряд электрона	$e = 1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m_e} = 1,75888 \cdot 10^{11} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$
Масса протона	$m_p = 938,256 \frac{\text{МэВ}}{c^2}$
Масса нейтрона	$m_n = 939,550 \frac{\text{МэВ}}{c^2}$
Магнитный момент нейтрона	$\mu_n = -1,913148 \mu_n$
Период полураспада нейтрона	$\tau_n = 1,01 \cdot 10^3 \text{ с}$
масса $\mu$ – мезона	$m_\mu = 105,659 \frac{\text{МэВ}}{c^2}$
Период полураспада $\mu$ - мезона	$\tau_\mu = 2,1983 \cdot 10^{-6} \text{ с} (4 \cdot 10^{-4})$
Энергия, соответствующая 1эВ.	$1,60202 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
«Температура», соответствующая энергии 1эВ.	11606К
Волновое число, соответствующее переходу в криптоне (стандарт длины)	$1/\lambda = 1650763,73 \text{ м}^{-1}$

## Физические свойства твердых тел

Вещества	Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$	Удельная теплоотдача, $\text{Ж/кг}\cdot\text{К}$	Удельная температура плавления, $10^4 \text{ Ж/кг}$	Линейный коэффициент теплового расширения, $10^{-4}, \text{К}^{-1}$	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$
Алюминий	2,60	896	32,20	2,30	659
Латунь	8,40	386	-	1,90	900
Серебро	10,50	234	8,80	1,90	960
Соплово	11,30	126	2,26	2,90	327
Олово	7,20	230	58,60	2,70	232
Лед	0,90	2100	33,50	-	0
Медь	8,90	395	17,60	1,60	1100
Платина	21,45	117	11,3	0,89	1770
Сталь	7,85	460	-	1,60	1300
Цинк	7,0	391	11,70	2,90	420

## Удельное сопротивление некоторых проводников при $^{\circ}\text{C}$ ( $\text{н}\Omega\cdot\text{м}$ )

Проводник	Удельное сопротивление	Проводник	Удельное сопротивление
Алюминий	25,8	Свинец	191,0
Графит	390,0	Ртуть	940,0
Медь	17,0	Нихром	1000,0
Железо	87,0	Сталь	100,0

## СОДЕРЖАНИЕ

**Предисловие**.....

### **ФРОНТАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.**

#### **ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ.**

1. Определение ускорения свободного падения.
2. Определение момента инерции вращающегося твердого тела маятником Обербека.
3. Определение модуль Юнга на способом изгиба.
4. Изучение законы колебательного движения.
5. Определение скорость звука в воздухе способом резонансом.
6. Определение отношения удельных теплоемкостей газов методом адиабатического расширения.
7. Определение вязкости жидкости по методу Стокса.
8. Изучение электростатического поля.
9. Определение емкость конденсатора с помощью мостика Уинстона.
10. Определение сопротивление и мощность лампочки накаливания.
11. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока
12. Определение ЭДС источника с помощью компенсации.
13. Измерение сопротивлений проводника с помощью мостиком постоянного тока.
14. Изучение явление термоэлектронный эмиссии.

### **ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебник для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1999.
2. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. М.: Наука. 1999.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т. 1-5. –Москва. Наука, 1977-1990 г.
4. Грибов Л.А., Прокофьева Н.И., Основы физики, Изд. «Гардарико» М., 1998
5. Рисбоев А.С., Холбоев А.М., Методические указания к лабораторным работам по курсу общей физики, ТошДТУ, 2002 г. 135 с.
6. Лабораторный практикум по физике, Под ред. Барсукова К.А. и Уханова Ю.И. Москва. Высшая школа, 1988 г.
7. Лабораторный практикум по физике, Под ред. Ахматова А.С., Москва, Высшая школа, 1980 г.
8. Физика полупроводников. Лабораторный практикум. Под ред. Ильина В.И., Санкт-Петербург, 1999 г.