

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Щаблюков Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 11.09.2023 17:40:55

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«СЕВЕРО - КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) в г. Пятигорске*

**Методические указания для проведения  
лабораторных работ по физике**

Пятигорск 2021

<b>Содержание</b>	<b>Стр.</b>
Введение.	3
Инструкция по технике безопасности	5
Тематический план лабораторных работ	6
Описание лабораторных работ	7
Приложение 1. Справочные материалы по физике	82
Приложение 2. Справочные материалы по математике	90
Учебно - методическое и информационное обеспечение дисциплины.	95

## Введение

Дисциплина «Физика» относится к вариативной части. Ее освоение происходит в 1 - 2 семестрах ОП ВО подготовки бакалавра направления 08.03.01 «Строительство». Изучение дисциплины «Физика» является важной составной частью естественнонаучного образования в повышении качества подготовки бакалавров данного направления. Дисциплина «Физика» базируется на знаниях, полученных в рамках школьного курса физики или соответствующих дисциплин среднего профессионального образования.

Целью освоения дисциплины «Физика» является формирование набора профессиональных и общекультурных компетенций будущего бакалавра по направлению 08.03.01 «Строительство».

Задачами освоения дисциплины «Физика» являются:

- изучение законов окружающего мира в их взаимосвязи; овладение фундаментальными принципами и методами решения научно-технических задач;
- формирование навыков по применению положений фундаментальной физики к грамотному научному анализу ситуаций, с которыми инженеру приходится сталкиваться при создании новой техники и новых технологий;
- освоение основных физических теорий, позволяющих описать явления в природе, и пределов применимости этих теорий для решения современных и перспективных технологических задач; формирование у студентов основ естественнонаучной картины мира.

В совокупности с другими дисциплинами базовой части ФГОС ВО дисциплина «Физика» направлена на формирование следующих компетенций бакалавра:

Индекс с	Формулировка:
ОПК-1	Способен решать задачи профессиональной деятельности на основе использования теоретических и практических основ естественных и технических наук, а также математического аппарата

В результате освоения содержания дисциплины «Физика» студент должен:

ЗНАТЬ	основные физические явления и законы механики, электротехники, теплотехники, оптики и ядерной физики и их математическое описание; методы анализа физических явлений в технических устройствах и системах; Методы решения практических задач исследования и моделирования физических и химических явлений и процессов в своей предметной области;
УМЕТЬ	объяснить основные наблюдаемые природные и техногенные явления и эффекты с позиций фундаментальных физических взаимодействий; работать с приборами и оборудованием физической лаборатории; решать практические задачи исследования и моделирования физических и химических явлений и процессов в своей предметной области; пользоваться методами анализа физических явлений в технических устройствах и системах
ВЛАДЕТЬ	естественнонаучной культурой в области физики, как частью общечеловеческой и профессиональной культуры; навыками использования базовых знаний о строении различных классов физических объектов для понимания свойств материалов и механизмов процессов, протекающих в природе; навыками правильной эксплуатации основных приборов и оборудования физической лаборатории; навыками обработки и интерпретирования результатов эксперимента; методикой

	решения практических задач исследования и моделирования математических, физических и химических задач в своей предметной области, методами анализа физических явлений в технических устройствах и системах.
--	---

Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Физика» составлены в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования, рабочим учебным планом и рабочей программой дисциплины «Физика».

## **Инструкция по технике безопасности при проведении лабораторных работ.**

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, изучившие правила техники безопасности.
2. Лабораторные работы могут проводиться только под руководством и наблюдением преподавателя.
3. При выполнении лабораторных работ студентам запрещается:
  - включать схемы под напряжением без проверки преподавателя;
  - прикасаться к незащищённым изоляцией частям схемы, находящихся под напряжением;
  - определять наличие напряжения на элементах цепи припомощи пальцев; проверка наличия напряжения производится только с помощью вольтметра и в присутствии преподавателя;
  - при работе на лабораторной установке прикасаться одновременно стен, радиаторов системы отопления и других металлических предметов;
  - включать рубильники, нажимать кнопки, прикасаться к электрическому оборудованию, не относящемуся к данной лабораторной работе без ведома преподавателя;
  - производить по ходу выполнения работы переключения в схеме, не обесточив её;
  - бросать соединительные провода на пол и на исследуемую установку;
  - заменять сгоревшие предохранители на рабочих щитах при включённых рубильниках;
  - класть на рабочий стол посторонние предметы;
  - входить в лабораторию в верхней одежде;
  - курение и зажигание огня.
4. Перед включением схемы обязательно предупредить членов бригады: «Осторожно! Включаю!».
5. При работе на установках, в которых может наблюдаться резонанс, соблюдать особую осторожность.
6. При наличии в схеме конденсаторных батарей, необходимо после отключения питания их разрядить под наблюдением преподавателя.
7. При обнаружении каких – либо неисправностей, исчезновения напряжения в сети, а также при несчастном случае, немедленно прекратить работу, отключить установку от электропитания и сообщить преподавателю.
8. Помнить, что при отключении цепей постоянного тока с индуктивностью возможно кратковременное резкое повышение напряжения.
9. Студенты, нарушившие правила техники безопасности, не допускаются к дальнейшей работе в лаборатории и привлекаются к ответственности.

### Тематический план лабораторных работ

№ темы	Наименование работы	Объем часов
1	Изучение движения тела брошенного под углом к горизонту.	1,5
2	Определение модуля сдвига методом крутильных колебаний.	1,5
3	Определение момента инерции махового колеса.	1,5
4	Определение скорости полета пули с помощью физического маятника.	1,5
5	Определение вязкости жидкости методом падающего шарика (метод Стокса).	1,5
6	Общие сведения об электроизмерительных приборах	1,5
7	Определение времени релаксации RC – цепи	1,5
8	Измерение сопротивления с помощью моста Уитстона.	1,5
9	Исследование электрической цепи постоянного тока.	1,5
<b>Итого за 2 семестр</b>		<b>13,5</b>
<b>3 семестр</b>		
10	Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.	3
11	Исследование колебаний в колебательном контуре	3
12	Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.	3
13	Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решётки.	3
14	Проверка закона Малюса.	3
15	Изучение внешнего фотоэффекта.	3
16	Определение теплоемкости металлов методом охлаждения.	3
17	Исследование космического излучения.	3
<b>Итого за 3 семестр</b>		<b>24</b>
<b>Итого</b>		<b>37,5</b>

## Описание лабораторных работ

### Лабораторная работа № 1. Изучение движения тела, брошенного под углом к горизонту

**Цель работы:** подтвердить на опыте справедливость формул кинематики, законов динамики и законов сохранения импульса и энергии.

**Оборудование:** установка, состоящая из пружинного пистолета с шариком и линейки.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

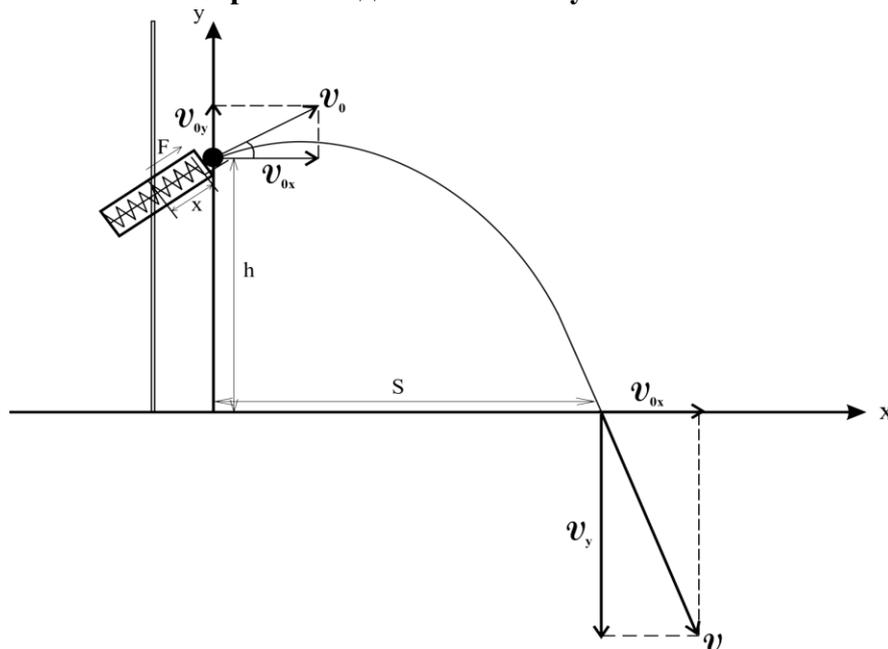
2. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

### Краткая теория

Основной задачей механики является определение положения тела в пространстве в любой момент времени. Зная координаты тела всегда можно найти его скорости и ускорения (по определению этих величин). Основными законами, связывающими эти величины, силы и массу тела являются законы Ньютона и законы сохранения.

Из второго закона Ньютона  $\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F$  легко получить уравнения движения тела под действием постоянной силы (равноускоренное движение или равномерное движение, если равнодействующая равна нулю).

### Теория метода и описание установки



Установка представляет собой пружинный пистолет, который можно установить на разной высоте  $h$  и под разными углами  $\alpha$  к горизонту. По шкале пистолета можно определить силу упругости пружины  $F$  и абсолютную ее деформацию  $\Delta l = x$ . По линейке, лежащей на столе, можно измерить дальность полета  $S$  шарика массой  $m$ .

Таким образом, непосредственно можно измерить высоту  $h$ , угол  $\alpha$ , силу  $F$ , сжатие  $x$ , дальность полета  $S$  и массу шарика  $m$ .

Результаты непосредственных измерений должны, в пределах погрешностей измерений, удовлетворять законам кинематики и динамики.

При деформации пружины на  $x$  см. на шарик будет действовать сила упругости  $F$ .

По формуле закона Гука,  $F = kx$ , найдем коэффициент упругости пружины

$$k = \frac{F}{x} \left( \frac{H}{m} \right) \quad (1)$$

Потенциальная энергия пружины  $W_{\text{уп}} = \frac{kx^2}{2}$  после ее распрямления перейдет в кинетическую энергию шарика, т.е.  $\frac{kx^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2}$ . Следовательно

$$v_0 = x \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{F \cdot x}{m}} \quad (2)$$

Таким образом, шарик начинает свободный полет с начальной скоростью  $v_0$ , направленной под углом  $\alpha$  к горизонту. Горизонтальная составляющая скорости

$$v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

вертикальная составляющая

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

Время полета шарика ограничено временем движения по вертикали. Записав уравнение движения по вертикали  $y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$ , зная, что  $y = 0$ ,  $y_0 = h$ , можно

вычислить время полета:

$$t = \frac{v_{0y} + \sqrt{v_{0y}^2 + 2gh}}{g} \quad (5)$$

Зная время полета, можно найти дальность полета

$$S = v_{0x}t \quad (6)$$

и сравнить со значением дальности  $S$ , измеренным непосредственно.

#### Выполнение работы.

1. Определите взвешиванием массу шарика  $m$ . Вычислите относительную погрешность массы  $m$ .

2. Закрепите пистолет на высоте  $h$  под углом  $\alpha$ . Вычислите относительные погрешности высоты  $h$  и угла  $\alpha$ .

3. Растянув пружину пистолета на  $x$  см, определите по динамометру силу  $F$ . Вычислите относительные погрешности  $x$  и  $F$ .

4. Выстрелите 5-7 раз при одних и тех же значениях  $x$  и  $F$ . При каждом выстреле измеряйте дальность полета  $S$ . Вычислите относительную погрешность непосредственного измерения дальности  $S$ .

5. Вычислите:

а) коэффициент жесткости пружины пистолета  $k$  по формуле (1);

б) начальную скорость полета шарика  $v_0$  по формуле (2);

в) вертикальную составляющую начальной скорости  $v_{0y}$ ;

г) вертикальную составляющую конечной скорости  $v_y$ ;

д) горизонтальную составляющую начальной скорости  $v_{0x}$ ;

е) горизонтальную составляющую конечной скорости  $v_x$ .

6. Вычислите дальность полета по формуле (6) и сравните со значением, полученным в пункте 4.

7. Вычислите изменение импульса шарика за время полета  $|\Delta\vec{p}|$ . Вычислите силу, изменившую импульс шарика за время полета.

8. Сравните значения потенциальной энергии сжатой пружины, начальной кинетической энергии шарика и конечной энергии шарика.

#### Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте принцип суперпозиции движений. Где он применяется?

2. Выведите уравнение для определения полета шарика, брошенного под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $v_0$ .

3. Выведите максимальную высоту подъема шарика, брошенного под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $v_0$ .

4. Выведите уравнение дальности полета шарика, брошенного под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $v_0$ .

5. Под каким углом надо бросить тело, чтобы дальность полета была максимальна? При каком угле бросания высота полета равна его дальности?.

6. Что такое деформация, «упругая деформация»? Сформулировать закон Гука.

7. Что такое потенциальная энергия? Выведите формулу потенциальной энергии сжатой пружины.

8. Что такое кинетическая энергия? Выведите формулу для кинетической энергии тела, движущегося поступательно.

9. Сформулируйте закон сохранения механической энергии. Когда он не выполняется?

10. Что такое импульс? Сформулируйте закон сохранения импульса.

## Лабораторная работа № 2. Определение модуля сдвига методом крутильных колебаний

**Цель работы:** определить модуль сдвига стальной проволоки методом крутильных колебаний.

**Оборудование:** крутильный маятник, микрометр, секундомер, линейка.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе допускаются лица, ознакомленные с принципом действия и мерами безопасности.

### Краткая теория

Изменение взаимного расположения частиц тела, которое приводит к изменению его формы и размеров, называют *деформацией*.

Деформации могут быть вызваны внешними воздействиями (механическими, электрическими или магнитными) или изменением температуры тела. Здесь рассматриваются деформации, возникающие при действии сил на тело.

В твердых телах деформацию называют *упругой*, если после прекращения действия силы она исчезает. Если же деформация сохраняется и после прекращения внешнего воздействия, то ее называют *пластической*. Промежуточный случай, т. е. неполное исчезновение деформации, принято называть *упругопластической* деформацией.

Наиболее простым видом деформации является *растяжение (сжатие)*. Оно, например, возникает в стержне (рис. 1. а,б) при действии силы, направленной вдоль его оси.

Если стержень длиной  $l$  при этом удлинился на  $\Delta l$ , то  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  является мерой деформации растяжения и называется *относительным удлинением*.

Другим видом деформации является *сдвиг* (рис.2. а, б). Сила, касательная к одной из граней прямоугольного параллелепипеда, вызывает его деформацию, превращая в

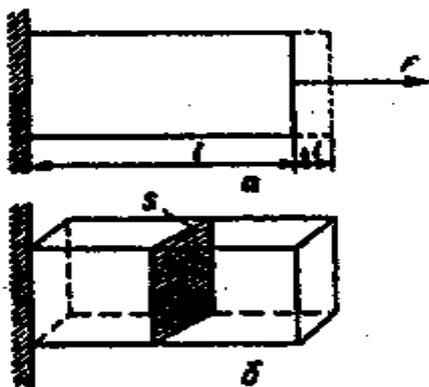


Рис. 1.

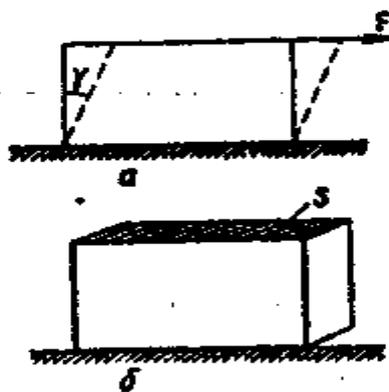


Рис. 2.

косоугольный параллелепипед (см. штриховые линии на рисунке). Угол  $\gamma$  называют углом сдвига, а  $\text{tg } \gamma$  — относительным сдвигом. Так как обычно угол  $\gamma$  мал, то можно считать  $\text{tg } \gamma = \gamma$ .

При действии на тело внешней деформирующей силы расстояние между атомами

(ионами) изменяется. Это приводит к возникновению внутренних сил, стремящихся вернуть атомы (ионы) в первоначальные положения. Мерой этих сил является *механическое напряжение* (или просто напряжение).

Непосредственно напряжение не измеряется. В ряде случаев его можно вычислить через внешние силы, действующие на тело. Косвенно напряжение можно определить по некоторым физическим эффектам.

Применительно к деформации растяжения *напряжение*  $\sigma$  можно выразить как отношение силы к площади поперечного сечения стержня (рис. 1, б):

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad [\text{Н/м}^2] \quad (1)$$

Для деформации сдвига напряжение  $\tau$  выражают как отношение силы к площади поверхности грани, к которой сила касательна (рис. 2. б). В этом случае  $\tau$  называют *касательным напряжением*:

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

Упругие малые деформации подчиняются закону Гука, согласно которому напряжение пропорционально деформации. Для двух рассмотренных случаев (растяжение, сжатие) это аналитически записывается так:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{и} \quad \tau = G\gamma, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль Юнга, а  $G$  — модуль сдвига.

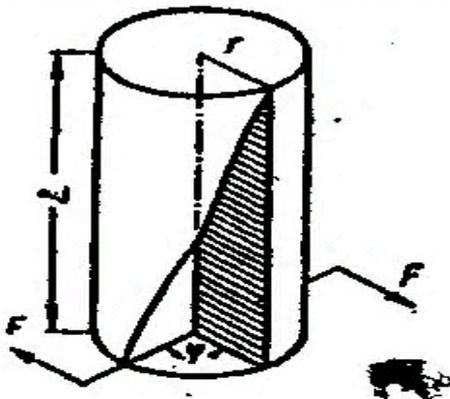


Рис.3.

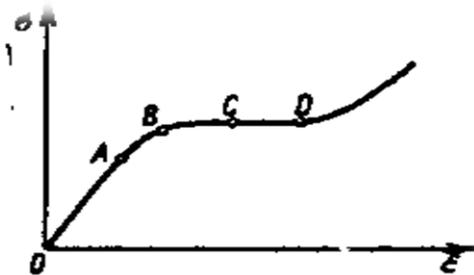


Рис.4.

Экспериментальная кривая растяжения приведена на рис. 4. Участок  $OA$  соответствует упругим деформациям, точка  $B$  — *пределу упругости*, характеризующему то максимальное напряжение, при котором еще не имеют места деформации, остающиеся в теле после снятия напряжения (остаточные деформации).

Горизонтальный участок  $CD$  кривой растяжения соответствует *пределу текучести* — напряжению, начиная с которого деформация возрастает без увеличения напряжения. И, наконец, напряжение, определяемое наибольшей нагрузкой, выдерживаемой перед разрушением, является *пределом прочности*.

Деформация кручения возникает, если один конец стержня (проволоки) закручивать парой силой  $F$  с моментом  $M$ , а другой конец закрепить неподвижно (рис.3). Под действием этой пары сил свободный конец стержня поворачивается на угол  $\varphi$ . Угол  $\varphi$  называют углом кручения. Деформация кручения является чисто сдвиговой, но неоднородной. Закон Гука для деформации кручения утверждает пропорциональность угла закручивания  $\varphi$  моменту кручения  $M$  при малых

углах  $\varphi$ :  $M = -f\varphi$ .

Знак «минус» показывает, что момент кручения направлен в сторону, обратную направлению закручивания. Константа  $f$  называется постоянной кручения (или модулем кручения). Можно показать, что постоянная кручения связана с модулем сдвига  $G$  формулой

$$f = \frac{\pi r^4 G}{2L} = \frac{\pi d^4 G}{32L},$$

соответственно

$$G = \frac{32L}{\pi d^4} f, \quad (4)$$

где  $r$  и  $d$  – радиус и диаметр проволоки соответственно;  $L$  – длина проволоки. Табличное значение модуля сдвига стали  $G_{\text{теор}} = 7,9 \cdot 10^{10}$  Па.

### Теория метода и описание установки

Для определения модуля сдвига проволоки  $G$  в работе используется метод крутильных колебаний. Крутильным маятником является массивный цилиндр, подвешенный на этой проволоке. Цилиндр совершает крутильные колебания, которые при малых углах закручивания  $\varphi$  являются гармоническими. Период этих колебаний можно найти, применяя к цилиндру второй закон Ньютона для вращательного движения:

$$I \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M. \quad (5)$$

Здесь  $I$  – момент инерции цилиндра,  $M$  – модуль момента упругих сил нити, действующих на цилиндр.

По закону Гука  $M = -f\varphi$ , поэтому

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + f\varphi = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega^2\varphi = 0. \quad (6)$$

Здесь  $\omega = \sqrt{\frac{f}{I}}$  – частота колебаний;  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{f}}$  – период колебаний. Отсюда

$$f = I\omega^2 = \frac{4\pi^2 I}{T^2}. \quad (7)$$

Момент инерции цилиндра относительно оси, проходящей через центры оснований, равен  $I = \frac{mD^2}{8}$ . Поэтому  $f = \frac{\pi^2 mD^2}{2T^2}$ . Подставляя  $f$  в формулу (4), получим выражение для модуля сдвига  $G$ :

$$G = \frac{16\pi mD^2 L}{T^2 d^4}. \quad (8)$$

где  $m$  – масса цилиндра

$D$  – диаметр цилиндра

$d$  – диаметр проволоки,  $d = 2r$ .

$L$  –длина проволоки

$T$  –период крутильных колебаний.

Период крутильных колебаний определяют, измеряя время  $t$ , необходимое для совершения  $n$  крутильных колебаний:

$$T = \frac{t}{n}. \quad (9)$$

Массу цилиндра определяют по формуле  $m = \rho V$ ,

где плотность  $\rho$  берут из таблицы (плотность стали  $\rho_{ст} = 7870 \text{ кг/м}^3$ ), а объём цилиндра находится по формуле  $V_{цил} = \pi D^2 h/4$ ,

где  $D$  и  $h$  – диаметр и высота цилиндра соответственно.

Тогда расчетная формула будет иметь вид:

$$G = Lh\rho \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \left( \frac{D}{d} \right)^4. \quad (10)$$

### Выполнение работы

1. Измерьте высоту  $h$  и диаметр  $D$  цилиндра, а также длину  $L$  и диаметр  $d$  проволоки.
2. Несколько раз измерьте время  $t$ , за которое маятник совершит  $n$  колебаний. Число колебаний  $n$  и количество опытов задаёт преподаватель
3. Результаты измерений представляют в виде свободной таблицы.
4. По формуле (9) вычислите период колебаний для каждого опыта и найти среднее значение периода.
5. Полученное значение периода подставьте в формулу (10) вычислите модуль сдвига  $G$ .
6. Вычислите абсолютную погрешность  $\Delta G = |G - G_{теор}|$  и относительную погрешность  $\varepsilon = \Delta G/G_{теор}$ .
7. Представьте окончательный результат и сравните с табличным значением.

### Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте закон Гука для деформаций растяжения, сдвига, кручения.
2. Каковы пределы применимости закона Гука?
3. Каков физический смысл модуля Юнга  $E$ , модуля сдвига  $G$ , постоянной кручения  $f$ ?
4. Сформулируйте второй закон Ньютона для вращательного движения. Каков смысл величин, входящих в этот закон?
5. Получите выражения для периода колебаний крутильного маятника.
6. Выведите формулу (10)

### Лабораторная работа № 3. Определение момента инерции махового колеса

**Оборудование:** маховик, набор грузов, линейка, штангенциркуль, секундомер.

**Цель работы:** найти момент инерции твердого тела.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе необходимо выполнять общие требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе допускаются лица, ознакомленные с принципом действия и мерами безопасности.

#### Краткая теория

Момент инерции  $I$  характеризует инерционные свойства тела во вращательном движении. Для твердого тела  $I$  представляет собой сумму моментов инерции всех его точек, т.е.

$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2, \quad (1)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -ой точки тела,  $r_i$  – ее расстояние от оси вращения,  $N$  – число точек тела.

Вообще говоря, вычисление момента инерции – математическая процедура. Действительно, выделяя в теле элемент объема  $dV$ , масса его будет равна  $m = \rho dV$ , где  $\rho$  – плотность вещества. Формула (1) в этом случае приобретает вид  $I = \int_V \rho r^2 dV$

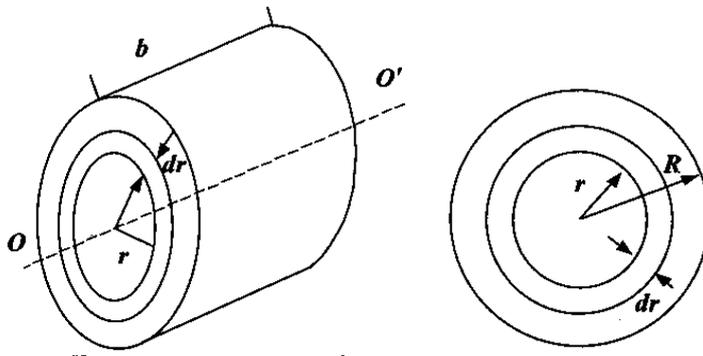


Рис.1

Если тело однородное, т.е.  $\rho = \text{const}$ , то

$$I = \rho \int_V r^2 \cdot dV. \quad (2)$$

Для тела правильной геометрической формы, такой интеграл может быть вычислен. Так, если тело имеет форму сплошного цилиндра, то, беря в качестве элемента объема цилиндр длиной  $b$ , радиуса  $r$  и толщиной стенки  $dr$  получим

$$dV = b2\pi r dr.$$

Следовательно,

$$I = \rho \int_0^R r^2 2\pi r b \cdot dr = \rho 2\pi b \int_0^R r^3 dr = \rho 2\pi b \frac{r^4}{4} \Big|_0^R = \rho \frac{\pi b R^4}{2}.$$

Так как,  $\pi R^2 b = V$  – объем сплошного цилиндра, а  $\rho \cdot V = m_0$  – его масса, то окончательно получаем

$$I = \frac{m_0 R^2}{2} \quad (3)$$

Для тел неправильной геометрической формы подобные расчеты могут быть достаточно сложными, поэтому разработаны различные экспериментальные способы определения моментов инерции. Наиболее простой из них предлагается в данной лабораторной работе.

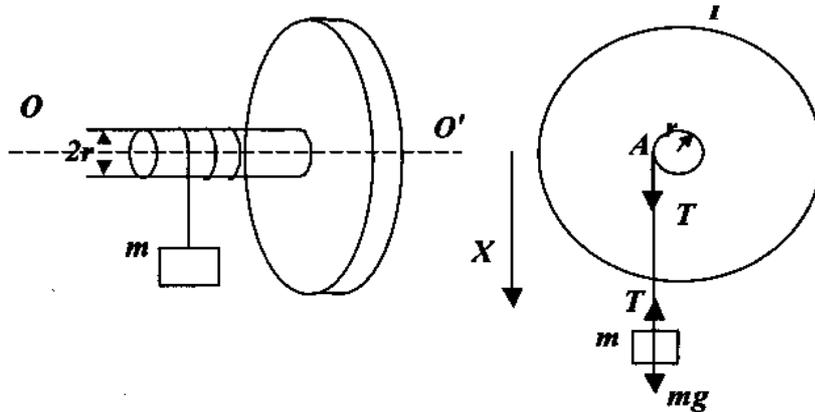


рис.2

На ось (вал) маховика, радиуса  $r$  наматывается нить длиной  $l$ , к которой прикреплен груз массой  $m$  (рис.2). Под действием силы натяжения нити  $T$ , маховик раскручивается и спустя время  $t_1$  нить с вала соскальзывает. Далее, вращаясь равнозамедленно, под действием момента сил трения  $M_{тр}$  маховик остановится за время  $t_2$ . Измеряя время  $t_1$  и  $t_2$ , зная массу груза  $m$  и длину нити  $l$ , при известном  $r$  можно получить формулу для экспериментального определения момента инерции маховика  $I$ .

В первом приближении не будем учитывать трение в течение времени  $t_1$ , то есть при разматывании нити. Мы имеем классическую задачу динамики двух тел: одно из которых (груз) движется поступательно, а другое (маховик) вращается.

Из второго закона Ньютона для поступательного и вращательного движений имеем:

$$\begin{cases} mg - T = ma, \\ M = I\varepsilon. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $a$  – ускорение, с которым опускается груз. Это же ускорение будет линейным (тангенциальным) ускорением точки  $A$  на оси маховика.

$\varepsilon$  – угловое ускорение точки  $A$ , причем  $\varepsilon = \frac{a}{r}$ .

$T$  – сила натяжения нити.

$M = Tr$  – момент силы натяжения нити, приложенной к валу маховика. Используя приведенные выше формулы, систему уравнений (4) запишем в виде:

$$\begin{cases} mg - T = ma, \\ T = I \frac{a}{r^2}. \end{cases} \quad (5)$$

Откуда легко получаем формулу для определения  $I$

$$I = mr^2 \left( \frac{g}{a} - 1 \right) \quad (6)$$

Так как груз движется равноускоренно без начальной скорости и за время  $t_1$  проходит путь  $l$  (длину нити), то

$$l = \frac{at_1^2}{2} \quad \text{и} \quad a = \frac{2l}{t_1^2}$$

Таким образом, окончательно получаем формулу для определения момента инерции махового колеса, при условии отсутствия трения.

$$I_1 = mr^2 \left( \frac{gt_1^2}{2l} - 1 \right) \quad (7)$$

#### Определение момента сил трения.

В момент соскальзывания нити с вала маховик приобретает угловую скорость

$$\omega_1 = \alpha_1 = \frac{a}{r} t_1 = \frac{2l}{t_1^2 r} t_1 = \frac{2l}{rt_1}. \quad \text{Под действием момента сил трения } M_{mp}, \text{ маховик спустя время}$$

$\Delta t = t_2$  остановится. Его момент импульса  $L$  изменится от значения  $I\omega_1$  до 0. Следовательно, принимая что  $M_{mp} = \text{const}$ , из закона изменения момента импульса имеем:

$$M_{mp} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{0 - I\omega_1}{t_2} = -\frac{I2l}{rt_1 t_2},$$

Здесь  $L = I\omega$  – момент импульса тела.

Считая  $I = I_1$ , для момента сил трения получим:

$$M_{mp} = \frac{2I_1 l}{rt_1 t_2} \quad (8)$$

(В формуле (7) знак минус для  $M_{mp}$  опущен).

Вообще говоря, этот же момент сил трения действует и на раскручивающийся маховик, то есть в течение времени  $t_1$ . Поэтому можно получить более точное значение момента инерции маховика  $I_2$ , с учетом  $M_{mp}$ .

В этом случае система уравнений (4) будет иметь вид:

$$\begin{cases} mg - T = ma, \\ M - M_{mp} = I\varepsilon. \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая (7) и, что  $M = Tr$ ,  $\varepsilon = \frac{a}{r}$ ,  $a = \frac{2l}{t_1^2}$ , (см. выше) получим:

$$\begin{cases} mg - T = ma, \\ T - \frac{M_{mp}}{r} = I \frac{a}{r^2} \quad \text{или} \end{cases}$$

$$\begin{cases} mg - T = ma, \\ T = I \left( \frac{a}{r^2} + \frac{2l}{r^2 t_1 t_2} \right) = I \left( \frac{a}{r^2} + \frac{a t_1}{r^2 t_2} \right) = I \frac{a^2}{r^2} \left( 1 + \frac{t_1}{t_2} \right). \end{cases}$$

Откуда найдем, что

$$I_2 = \frac{mr^2}{1 + \frac{t_1}{t_2}} \left( \frac{gt_1^2}{2l} - 1 \right) = \frac{I_1}{1 + \frac{t_1}{t_2}} \quad (10)$$

Формула (9) более точная экспериментальная формула для определения момента инерции маховика.

Заметим, что если трения пренебрежимо мало и  $t_2 \gg t_1$ , то  $\frac{t_1}{t_2} \approx 0$  и  $I_2 \approx I_1$ , т.е. формулы (9) и (6) практически совпадают.

#### Выполнение работы.

1. Определить и записать значения массы груза  $m$ , длины нити  $l$  и радиус вала маховика  $r$ .
2. Намотать в один слой нить на вал маховика до полного подъема груза.
3. Отпуская груз, включить два секундомера. Один зафиксировать в момент соскальзывания нити, т.е. время  $t_1$ , а другой во время полной остановки маховика, т.е. измерить время  $t = t_1 + t_2$ . Очевидно  $t_2 = t - t_1$ .
4. Измерения по п.3 провести несколько раз (минимум 3 раза) и результаты занести в таблицу измерений. Вычислить среднее  $t_{1cp}$  и  $t_{2cp}$ .

	$t_1$ (с)	$t_2$ (с)	$t$ (с)	$I_1$ (кг·м <sup>2</sup> )	$M_{mp}$ (Н·м)	$I_2$ (кг·м <sup>2</sup> )	$\delta I$	$\Delta I$ (кг·м <sup>2</sup> )

5. Используя значения  $m$ ,  $l$ ,  $r$  и средние значения  $t_1$ ,  $t_2$  по формулам (6) и (7) рассчитать экспериментальные значения момента инерции  $I_1$  и момент сил трения  $M_{mp}$ .
6. Сравнить полученное значение  $I_1$  и теоретическое значение  $I_0 = \frac{m_0 R^2}{2}$ ;  $m_0$  и  $R$  приведены на маховике.
7. По формуле (9) вычислить  $I_2$  – момент инерции маховика, определенный с учетом трения.
8. Сравнить значения  $I_2$  и  $I_0$  и сделать вывод.
9. Оценить погрешности проведенных измерениях  $I_1$  и  $I_2$ .  $\delta I_1$ ,  $\delta I_2$  и  $\Delta I_1$ ,  $\Delta I_2$  и занести их в таблицу.
10. Записать полученные результаты в виде:  $I = I \pm \Delta I$ .

#### Контрольные вопросы.

1. Какую величину называют моментом инерции? В каких единицах он измеряется? Какое свойство тела он характеризует?
2. Вывести формулу для момента инерции цилиндра.
3. Какой закон положен в основу вывода расчетной формулы (6).
4. Сформулируйте закон изменения момента импульса.
5. Выведите формулу (9) для момента инерции маховика с учетом трения.
6. Почему при выполнении работы рекомендуется наматывать нить на вал в один слой?
7. Получите формулы ошибок для  $\delta I_1$ ,  $\delta I_2$ .

## Лабораторная работа № 4. Определение скорости полета пули с помощью физического маятника

### Определение скорости полета пули с помощью физического маятника

**Цель работы:** определение скорости полета пули с помощью физического маятника.

**Оборудование:** установка, состоящая из физического маятника, подвешенного на горизонтальной оси и транспортира; пневматический пистолет, дротик.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

### Краткая теория

Физический маятник состоит из уловителя ("А" на рис.1) в виде цилиндра, заполненного пластичным материалом, который закреплен на стержне, способном свободно, с очень малым трением, качаться вместе с уловителем вокруг неподвижной оси. На рис.1 эта ось вращения (точка "О") перпендикулярна к плоскости рисунка. Выстрел производится из пневматического пистолета, установленного так, чтобы вектор скорости пули был направлен горизонтально по прямой, проходящей через центр цилиндра с пластилином и перпендикулярно оси вращения О. Пуля, застревая в пластилине, теряет свою начальную скорость и одновременно сообщает маятнику некоторый момент импульса. По завершении неупругого удара маятник отклоняется от вертикальной линии ОС на некоторый максимальный угол  $\varphi$ , который измеряется транспортиром – по максимальному смещению указателя, жестко закрепленного на стержне.

Для двух моментов времени, до удара, и после неупругого удара (под "ударом" мы подразумеваем относительно быстрый процесс торможения пули в пластилине) можно применить закон сохранения момента импульса:

$$mva = (I + ma^2)\omega_0, \quad (1)$$

где  $m$  – масса пули,  $v$  – скорость пули до удара,  $a$  – расстояние от оси до точки удара пули,  $I$  – момент инерции маятника после удара. Вторым членом в скобках в (1) можно пренебречь далеко не всегда (для нашего случая вам необходимо на основании измерений показать (или опровергнуть) возможность такого упрощения). При неупругом ударе закон сохранения механической энергии не выполняется, однако, к процессу качания маятника, мы можем применить закон сохранения энергии. Непосредственно после удара маятник вместе с засевшей в нем пулей будет, как мы видели из (1), иметь угловую скорость, равную  $\omega_0$ . Следовательно, он будет иметь и соответствующий ей запас кинетической энергии, который затем в момент наибольшего отклонения (и мгновенной остановки маятника) превратится в потенциальную энергию.

То есть

$$E_k = \frac{(I + ma^2)\omega_0^2}{2} \quad (2)$$

$$E_n = \left( M + m \frac{a}{l} \right) gh \quad (3)$$

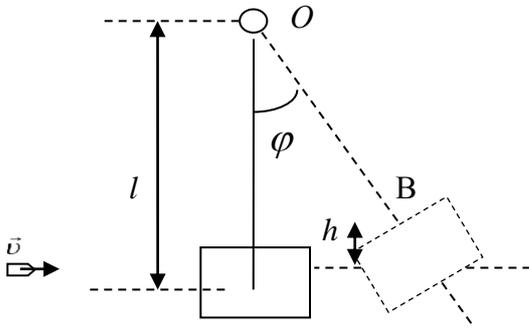


Рис. 1

$$E_k = E_n, \text{ следовательно } \frac{(I + ma^2)\omega_0^2}{2} = \left( M + m \frac{a}{l} \right) gh \quad (4)$$

где  $M$  – масса баллистического маятника,  $h$  – высота максимального поднятия его центра масс в точке останова,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения на широте г. Пятигорска,  $l$  – расстояние от оси вращения до центра масс маятника (без пули). Посредством балансировки используемого в данной работе физического маятника удалось установить, что центр масс маятника почти совпадает с точкой крепления стержня с цилиндром (т. В на рис. 1). Таким образом, расстояние  $l$  принимается равным длине стержня ОВ. Второе (малое) слагаемое в выражении для потенциальной энергии (3) дополнительно учитывает, что центр масс пули в общем случае не совпадает с центром масс маятника. Из рис.2 видно, что  $h = l - l \cos \varphi = l(1 - \cos \varphi) = 2l \sin^2 \frac{\varphi}{2}$ , где  $l$  – расстояние

от оси вращения О до центра масс маятника С. Итак, мы получили уравнение

$$\frac{1}{2}(ma^2 + I)\omega_0^2 = \left( m \frac{a}{l} + M \right) gh = 2 \left( m \frac{a}{l} + M \right) gl \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (5)$$

Таким образом, на основании уравнений (1) и (5) получаем основную рабочую формулу

$$v = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\sqrt{(ma^2 + I) \left( m \frac{a}{l} + M \right) gl}}{ma}. \quad (6)$$

Все величины, входящие в выражение (6), могут быть определены экспериментально.

#### Выполнение работы:

Масса цилиндра-ловителя  $m_1 = 91$  г. Линейная плотность стержня, масса, приходящаяся на единицу длины:  $\mu = 1,97$  г/см, тогда полная масса стержня  $m_2 = \mu \cdot l$ . Следовательно, масса маятника  $M = m_1 + m_2$ . Расстояние -  $a$  от оси вращения до точки удара измеряют миллиметровой линейкой. Положение центра масс маятника соответствует точке соединения ловителя и стержня. Длину стержня  $l$  определяют как расстояние от точки подвеса до точки соединения ловителя и трубки.

#### 1. Определение момента инерции физического маятника.

Момент инерции физического маятника находят по периоду его качаний, равному

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}}, \quad (7)$$

(величины  $M$  и  $l$  нами уже определены!). Обратите внимание, что для достаточно надежного измерения периода качаний мы должны обеспечить выполнение следующих условий: 1). Амплитуда качаний должна быть достаточно мала, чтобы можно было пренебречь ее влиянием на период качаний; 2). Нужно проследить за отсутствием качаний маятника по другой ортогональной оси (или дождаться их полного затухания, если они по каким-либо причинам возникли); 3) Период качаний надо определить как среднее за 20—30 качаний, чтобы уменьшить погрешность измерения времени секундомером.

Момент инерции вычисляется, исходя из (7), как

$$I = \frac{MglT^2}{4\pi^2}. \quad (8)$$

Теоретическое значение момента инерции можно найти как сумму момента инерции стержня относительно оси вращения, перпендикулярной стержню и проходящей через один из его концов  $I_{cm} = \frac{1}{3} \cdot m_2 \cdot a^2$  и момент инерции уловителя, который (в связи с достаточно большим расстоянием до оси вращения) можно принять за материальную точку, тогда  $I_{yl} = m_1 \cdot a^2$  а теоретическое значение момента инерции баллистического маятника

$$I_{теор} = I_{cm} + I_{yl} = \frac{1}{3} \cdot m_2 \cdot a^2 + m_1 \cdot a^2 \quad (9)$$

Рассчитать погрешность изменения.  $\delta = \frac{|I_{теор} - I|}{I_{теор}} \cdot 100\%$

## 2. Определение скорости полета пули.

Масса каждой пули определяем взвешиванием. Это можно сделать потому, что логарифмический декремент затухания этих колебаний весьма мал и их амплитуда довольно долго остается почти постоянной (попытайтесь экспериментально оценить величину декремента!). 1) Измерить взвешиванием массу пули. Оценить погрешность определения массы. 2) Произвести выстрел. Отметить максимальный угол  $\alpha$  отклонения указателя по транспортиру. Измерение угла отклонения  $\alpha$  надежнее производить не только по амплитуде отклонения маятника при первом качании, но и по размаху его колебаний, длящихся некоторое время после удара (при этом полезно применять и усреднение отдельных отсчетов). Выстрел производить только по неподвижному цилиндру. Повторить опыт 5 раз. Найти среднее значение угла отклонения и погрешность измерения угла. 3) Вычислить значение скорости полета пули по формуле (6). Вычислить погрешность определения скорости полета пули. 4) Записать окончательный результат. Сделать вывод.

### Контрольные вопросы.

1. Как определяется кинетическая энергия при поступательном движении? При вращательном движении?
2. Объясните, почему при неупругом ударе не выполняется закон сохранения механической энергии.
3. Сформулируйте и запишите закон сохранения импульса для неупругого взаимодействия пули и физического маятника (объясните вывод формулы (1)).
4. Сформулируйте теорему Штейнера.
5. Что такое момент инерции? Как определяется момент инерции стержня относительно оси, проходящей через один его концов.
6. Вывести формулу (6).

## Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом падающего шарика (метод Стокса)

**Цель работы:** познакомиться с методом измерения вязкости жидкой среды.

**Оборудование:** стеклянный цилиндр, заполненный глицерином, секундомер, пинцет, шарики, микрометр или отсчетный микроскоп.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

### Краткая теория.

**Вязкость (внутреннее трение)** — это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила.

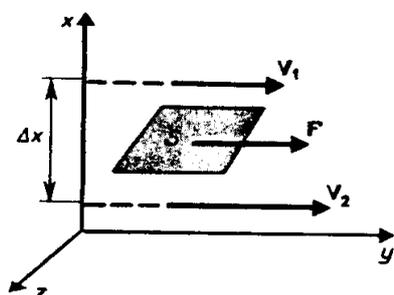


рис. 1

Сила внутреннего трения  $F$  тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоев  $S$  (рис.), и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою. На рис. 1 представлены два слоя, отстоящие друг от друга на расстоянии  $\Delta x$  и движущиеся со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . При этом  $v_1 - v_2 = \Delta v$ . Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, **перпендикулярно** скорости течения слоев. Величина

$\Delta v / \Delta x$  показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении  $x$ , перпендикулярном направлению движения слоев, и называется **градиентом скорости**. Таким образом, можно считать, что модуль силы внутреннего трения равен:

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности  $\eta$ , зависящий от природы жидкости, называется **динамической вязкостью** (или просто **вязкостью**).

Единица вязкости — **паскаль-секунда** (Па·с): 1 Па·с равен динамической вязкости среды, в которой при ламинарном (гладком) течении и градиенте скорости с модулем, равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения в 1 Н на 1 м<sup>2</sup> поверхности касания слоев (1 Па·с = 1 Н·с/м<sup>2</sup>). Применяется также внесистемная единица — **пуаз** (П): 1 Па·с = 10 П.

Чем больше вязкость, тем сильнее жидкость отличается от идеальной, и тем большие силы внутреннего трения в ней возникают. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен. Для жидкостей  $\eta$  с увеличением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается, что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения. Так, динамическая вязкость воды уменьшается от  $1,792 \cdot 10^{-2}$  П до  $0,284 \cdot 10^{-2}$  П (т.е. в 6,3 раза) при увеличении температуры от 0 °С до 100 °С, а у воздуха в этом же диапазоне вязкость увеличивается от  $1,709 \cdot 10^{-4}$  П до  $2,175 \cdot 10^{-4}$  П.

Существует два режима течения жидкостей. Течение называется **ламинарным (слоистым)**, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и **турбулентным (вихревым)**, если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа).

Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхностей трубы обычно происходит образование вихрей.

Профиль усредненной скорости при турбулентном течении в трубах отличается от параболического профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубы и меньшей кривизной в центральной части течения.

Английский ученый О. Рейнольдс (1842—1912) установил, что характер течения зависит от безразмерной величины, называемой числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta} . \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$\langle v \rangle$  – средняя по сечению трубы скорость жидкости;

$d$  – характерный линейный размер, например диаметр трубы;

$\eta$  – динамическая вязкость жидкости.

Отношение  $\nu = \eta/\rho$  называется **кинематической вязкостью**, поэтому (2) можно представить следующим образом:

$$R_e = \frac{\langle v \rangle d}{\nu} . \quad (3)$$

При малых значениях числа Рейнольдса ( $R_e \leq 1000$ ) наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области  $1000 \leq R_e \leq 2000$ , а при  $R_e = 2300$  (для гладких труб) течение турбулентное. Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей (газов) в трубах разных сечений одинаков.

### **Теория метода и описание установки.**

Вязкость проявляется при движении не только жидкости по сосудам, но и тел в жидкости. При небольших скоростях в соответствии с уравнением Ньютона сила сопротивления движущемуся телу пропорциональна вязкости жидкости, скорости движения тела и зависит от размеров тела. Так как невозможно указать общую формулу для силы сопротивления, то ограничимся рассмотрением частного случая.

Наиболее простой формой тела является сфера. Для сферического тела (шарик)

зависимость силы сопротивления при его движении в сосуде с жидкостью от перечисленных выше факторов выражается **законом Стокса**:

$$F_{mp} = 6\pi\eta r v, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус шарика;  
 $v$  – скорость движения.

Этот закон получен в предположении, что стенки сосуда не влияют на движение тела.

При падении шарика в вязкой среде (рис. 3) на него действуют три силы:

- сила тяжести  $mg = \frac{4}{3}\rho\pi r^3 g$ ;
- выталкивающая (архимедова)  $F_A = m_{жс}g = \frac{4}{3}\rho_{жс}\pi r^3 g$ ,

где  $m_{жс}$  – масса вытесненной шаром жидкости;  $\rho_{жс}$  – ее плотность;

- $F_{тр}$  – сила сопротивления, вычисляемая по формуле (4).

При попадании шарика в вязкую жидкость его скорость уменьшается. Так как сила сопротивления прямо пропорциональна скорости, то и она будет уменьшаться до тех пор, пока движение не станет равномерным. В этом случае:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_{mp} = 0. \quad (5)$$

В скалярной форме при подстановке соответствующих выражений для сил, формула (5) будет иметь вид

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

где  $v_0$  – скорость равномерного движения (падения) шарика. Из (6) получаем выражение для динамической вязкости:

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_{жс})r^2 g}{9 v_0}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива для движения шарика не только в жидкости, но и в газе.

Экспериментальная установка состоит из стеклянного цилиндра, заполненного глицерином. На цилиндре нанесены две горизонтальные метки (проволочные кольца), расположенные друг от друга на расстоянии  $l$  (верхняя метка должна быть ниже уровня глицерина на 5 – 8 см.). Вязкость глицерина зависит от температуры следующим образом:

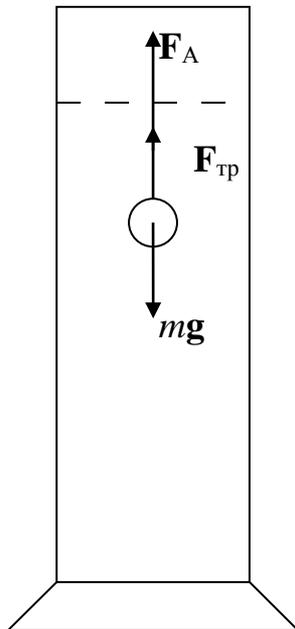


Рис.2.

$T, ^\circ\text{C}$	3	18	21
$\eta, \text{П}$	42,20	10,69	7,78
$\nu, \text{см}^2/\text{с}$	33,40	8,48	8,18

### Ход работы:

1. Измерив диаметр шарика, опустить шарик в жидкость как можно ближе к оси цилиндра.
2. Включить секундомер в момент прохождения шариком верхней метки.

3. Выключить секундомер в момент прохождения шариком нижней метки.
4. Повторить опыт несколько (7 – 9) раз. Вычислить среднее время  $t_{cp}$ , за которое шарик проходит между двумя метками.
5. Измерить расстояние  $l$  между метками.
6. Вычислить скорость падения шариков  $v_0 = l/t_{cp}$ .
7. Подставить значение скорости в формулу (7), вычислить вязкость глицерина.
8. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

$t_1, c$	$t_2, c$	$t_3, c$	$t_4, c$	$t_5, c$	$t_6, c$	$t_7, c$	$t_8, c$	$t_9, c$	$t_{cp}, c$	$r, m$	$v_0, m/c$	$l, m$	$\eta, П$

*Примечание:* плотность свинца  $\rho = 11,350 \text{ г/см}^3$

плотность глицерина  $\rho_{ж} = 1,264 \text{ г/см}^3$ .

#### Контрольные вопросы.

1. Что такое внутреннее трение?
2. От чего зависит сила внутреннего трения?
3. Как записывается формула Ньютона для внутреннего трения?
4. Что показывает градиент скорости? В каких единицах он измеряется?
5. От чего зависит сила трения при движении тел шарообразной формы в вязкой среде?
6. Какие силы действуют на падающий в вязкой среде шарик и каков характер движения шарика?
7. В каких единицах измеряют вязкость? От чего она зависит?

## Лабораторная работа № 6. Общие сведения об электроизмерительных приборах

**Цель работы:** изучение принципов работы и устройства электроизмерительных приборов.

**Оборудование:** электроизмерительные приборы различных систем.

**Указания мер безопасности:** При работе необходимо выполнять общие требования безопасности для физической лаборатории.

### Классификация приборов

Все электроизмерительные приборы можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по роду измеряемой величины (табл. 1),
- 2) по роду тока (табл. 2),
- 3) по степени точности (табл. 3),
- 4) по принципу действия (табл. 4),
- 5) по характеру отсчетного устройства,
- 6) по характеру применения.

Таблица 1.

Классификация электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины

Род измеряемой величины	Название	Условное обозначение
Ток	Амперметр	А
	Килоамперметр	кА
	Миллиамперметр	mA
	Гальванометр	Г
Напряжение	Вольтметр	В
	Киловольтметр	кВ
	Милливольтметр	mВ
	Электрическое сопротивление	Омметр Мост
Электрическая мощность	Ваттметр	W
	Киловаттметр	кW
Электрическая энергия	Счетчик ваттчасов Счетчик гектоваттчасов	
Количество электричества	Счетчик киловаттчасов	
	Счетчик амперчасов	

Таблица 2

Род тока	Условное обозначение
Постоянный	—
Переменный	⏏
Постоянный и переменный	⏏

Число, характеризующее класс точности прибора, представляет собою выраженное в процентах отношение допускаемой основной абсолютной погрешности прибора в рабочей части шкалы к верхнему пределу измерения прибора. При этом под основной погрешностью прибора понимается его погрешность при нормальных рабочих условиях, когда все внешние неблагоприятные влияния устранены. Под рабочей частью шкалы для приборов с равномерной шкалой понимается вся шкала, а для приборов с неравномерной шкалой - ее часть в пределах от 25% до 100% от верхнего предела шкалы. Таким образом, для всей рабочей части шкалы допускается одна и та же абсолютная погрешность. Классы точности приборов: 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

Класс точности прибора необходим для расчета погрешностей измерения. Обозначим класс точности «С». Согласно определению

$$C = \frac{\Delta x}{x_{пред}} \cdot 100\%, \text{ где } x_{пред} - \text{число делений на шкале.}$$

$$\text{Тогда } \Delta x = \frac{C \cdot x_{пред}}{100\%}$$

Погрешность измерения

$$\sigma x = \frac{\Delta x}{x_{изм}} \cdot 100\%, \text{ где } x_{изм} - \text{число делений до стрелки на шкале}$$

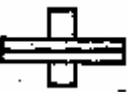
$$\sigma x = \frac{\Delta x}{x_{изм}} \cdot 100\% = \frac{C \cdot x_{пред} \cdot 100\%}{100\% \cdot x_{изм}} = \frac{C \cdot x_{пред}}{x_{изм}}$$

Обозначим  $x_{пред}=N$ ,  $x_{изм}=n$ , тогда

$$\sigma x = \frac{N}{n} C$$

Таблица 3

Систематизация приборов по принципу действия.

Система	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Тепловая	

По характеру отсчетного устройства различают приборы:

- а) с непосредственным отсчетом,
- б) с управляемым отсчетом,
- в) самопишущие.

По характеру применения измерительные приборы делятся на стационарные (щитовые)

и переносные.

Наиболее важные характеристики электроизмерительного прибора помечаются условными знаками (табл. 5) на его лицевой стороне, обычно на шкале (рис. 1). По ГОСТу 1845—42 на шкале прибора должны быть указаны:

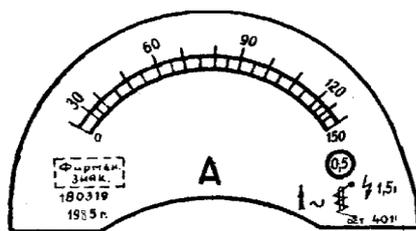


рис.1

- 1) марка прибора,
- 2) заводской номер,
- 3) обозначение единицы измерения измеряемой величины,
- 4) номер ГОСТа,
- 5) класс точности,
- 6) условное обозначение рода тока,
- 7) условное обозначение системы прибора,
- 8) условное обозначение рабочего положения,
- 9) условное обозначение испытательного напряжения изоляции,
- 10) год выпуска.

#### **Требования, предъявляемые к электроизмерительным приборам**

Каждый электроизмерительный прибор должен отвечать следующим основным требованиям:

- 1) быть, по возможности, точным; основная погрешность его не должна превышать значений, установленных ГОСТом 1845—42 для того класса, к которому прибор относится;
- 2) величина погрешности не должна изменяться с течением времени;
- 3) дополнительные погрешности должны быть минимальными и, во всяком случае, не выше значений, установленных ГОСТом 1845—42;
- 4) мощность, развиваемая в приборе, должна быть мала;
- 5) давать возможность непосредственно отсчитывать измеряемую величину в установленных в России единицах;
- 6) иметь, по возможности, равномерную шкалу;
- 7) обладать хорошим успокоением;
- 8) иметь хорошую изоляцию;
- 9) обладать выносливостью к перегрузкам;
- 10) прибор должен быть прост в конструктивном отношении и, по возможности, быть недорогим.

Условные обозначения технических характеристик приборов

Техническая характеристика	Условное обозначение.
Класс точности 2.5.....	⊙2.5
Изоляция прибора испытана напряжением. Прибор предназначен для включения в цепь постоянного тока...	2 кV -
Прибор предназначен для включения в цепь как переменного так постоянного тока...	⊐
Прибор предназначен для включения в цепь переменного тока...	⊐
Прибор предназначен для работы: А) в вертикальном положении.....	⊥
Б) в горизонтальном положении....	→ или -
В) под углом.....	∠α

### Приборы для измерения тока и напряжения. Приборы магнитоэлектрической системы

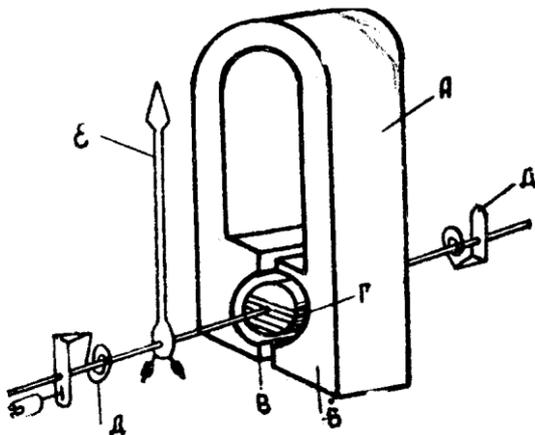


Рис.2

алюминиевый каркас с обмоткой из медной или алюминиевой изолированной проволоки.

При наличии в обмотке измеряемого тока между ним магнитным поле возникает механическое взаимодействие, под влиянием которого подвижная часть стремится повернуться на некоторый угол. Вращающий момент, действующий на катушку при протекании по ней измеряемого тока, пропорционален силе тока и индукции магнитного поля постоянного магнита.

Так как магнитное поле в воздушном зазоре равномерно и направлено радиально, а противодействующий момент, создаваемый пружинами *Д*, пропорционален углу поворота подвижной части прибора, то отклонение стрелки *Е* пропорционально измеряемому току, "Поэтому шкала -магнитоэлектрических приборов равномерная, что является большим преимуществом приборов этой системы.

Достоинствами магнитоэлектрических приборов являются:

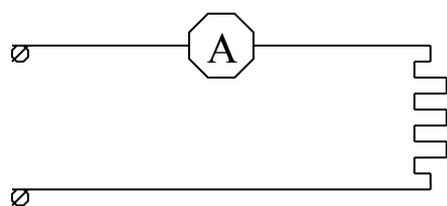
- 1) большая точность (0,1%).
- 2) высокая чувствительность (до  $5 \frac{\text{дел}}{\mu\text{а}}$ )
- 3) малое влияние внешних магнитных полей,
- 4) незначительное влияние температуры,
- 5) малая потребляемая мощность,
- 6) равномерная шкала.

К их недостаткам относятся:

- 1) пригодность только для постоянного тока;
- 2) чувствительность к перегрузкам, обусловленная тем, что при перегрузках пружины легко перегреваются и меняют свои упругие свойства или совсем перегорают;
- 3) сравнительно высокая стоимость.

Магнитоэлектрические приборы благодаря своим достоинствам получили весьма широкое распространение. Они используются как образцовые и лабораторные приборы в цепях постоянного тока, где требуется относительно высокая чувствительность и повышенная точность. Их можно применять в качестве гальванометров, амперметров и вольтметров.

Устройство амперметров магнитоэлектрической системы таково, что ток, проходя по прибору, создает вращающий момент, который вызывает отклонение его подвижной части



на угол, определяющий величину тока, идущего через амперметр. Для определения по показанию амперметра тока в каком-либо приемнике энергии необходимо, чтобы ток этого приемника был равен току амперметра, что достигается последовательным соединением амперметра с приемником (рис. 3). В некоторых случаях

Рис 3.

приходится измерять токи, превышающие номинальный ток

прибора. Для расширения пределов измерения магнитоэлектрических амперметров применяют шунты, которые представляют собой калиброванные сопротивления, включаемые параллельно амперметру и позволяющие пропускать через него лишь некоторую долю измеряемого тока. Схема включения шунта представлена на рис 4.

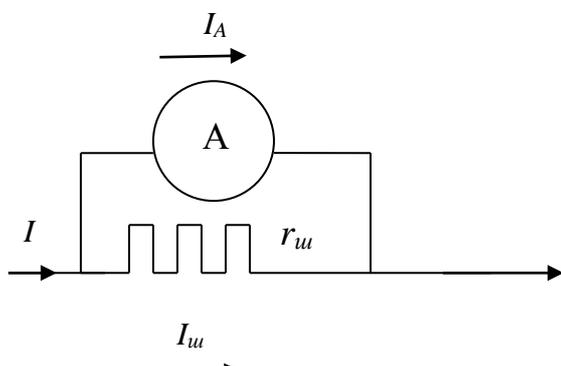


Рис 4.

Измеряемый ток в точке 1 разветвляется на два: ток, идущий через амперметр  $I_A$ , и ток, идущий через шунт  $I_{ш}$ . По закону Кирхгофа  $I = I_A + I_{ш}$   
Напряжение между точками 1 и 2

$$U = I_A \cdot r_A = I_{ш} \cdot r_{ш}$$

Отсюда требуемое сопротивление шунта

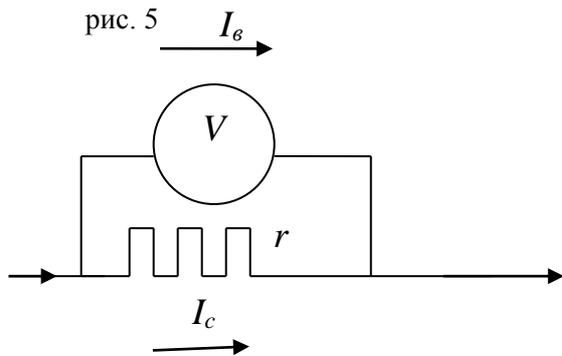
$$r_{ш} = \frac{I_A}{I - I_A} \cdot r_A = \frac{r_A}{n - 1}, \quad \text{где } n$$

показывает, во сколько раз расширяются пределы измерения, и называется

шунтирующим множителем. Так, чтобы увеличить в 100 раз ток, измеряемый амперметром,

сопротивление шунта должно составлять  $\frac{1}{99}$  часть сопротивления амперметра. Тогда 99% измеряемого тока будет проходить через шунт, а 1% через амперметр.

Вольтметр магнитоэлектрической системы, включаемый параллельно, устроен так (рис. 5), что напряжение, приложенное к его зажимам, вызывает в нем ток, который отклоняет подвижную часть на угол, определяющий величину напряжения.



В некоторых случаях приходится измерять напряжение, превышающее верхний предел измерения. С этой целью применяют добавочные сопротивления, которые включаются последовательно с вольтметром (рис. 6). При этом измеряемое напряжение  $U$  делится на две части:  $U_v$  – на зажимах вольтметра и  $U_о$  – на добавочном сопротивлении. Ток в цепи прибора будет:

$$I_v = \frac{U}{r_v + r_o} = \frac{U_v}{r_v},$$

откуда измеряемое напряжение  $U = U_v \cdot \frac{r_v + r_o}{r_v} = U_v \cdot (\frac{r_o}{r_v} + 1) = U_v \cdot n$

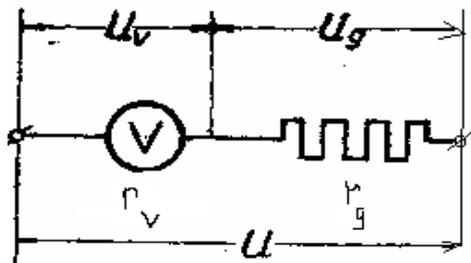


рис.6

Множитель  $\frac{r_o}{r_v} + 1 = n$  может быть определен, если известно сопротивление вольтметра

и добавочное сопротивление  $r_o = r_v \cdot (n - 1)$

Множитель  $n$  показывает, во сколько раз измеряемое напряжение больше напряжения на вольтметре.

### Приборы электромагнитной системы

Приборы электромагнитной системы являются наиболее распространенными. Принцип их работы основан на взаимодействии между магнитным полем измеряемого тока и ферромагнитным телом.

Схема конструкции электромагнитного прибора изображена на рис. 7.

Сердечник  $D$  из мягкого железа, эксцентрично закрепленный на вращающейся оси  $C$ , может входить внутрь неподвижной катушки  $B$ , обтекаемой измеряемым током. Противодействующий момент создается пружиной  $P$ . На оси закреплены также стрелка  $5$  и поршень  $P$  воздушного успокоителя.

Так как сила взаимодействия между магнитным полем и железным сердечником в

первом приближении пропорциональна квадрату тока, то шкала электромагнитных приборов неравномерная. Частичного выравнивания ее достигают подбором соответствующей формы сердечника и катушки.

Приборы электромагнитной системы пригодны для измерений в цепях как по стоянного, так и переменного тока, ибо направление силы, действующей на сердечник, не зависит от направления магнитного поля и, следовательно, от направления тока, протекающего по обмотке прибора.

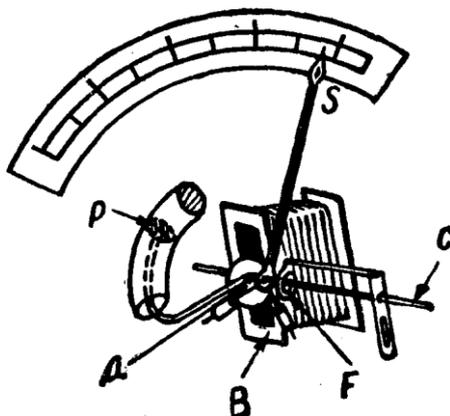


Рис 7.

Вследствие относительной слабости собственного магнитного поля катушки приборы электромагнитной системы весьма подвержены влиянию внешних магнитных полей. Поэтому во время работы их не следует располагать вблизи проводов, несущих сильные токи, а также в области магнитных полей реактивных катушек. При этом следует иметь в виду, что постоянное магнитное поле практически не оказывает влияния на показания прибора, измеряющего переменный ток, и, наоборот, переменное магнитное поле не влияет на результат измерений постоянных токов.

В лабораторных приборах высокого класса точности для уменьшения влияния внешних магнитных полей применяют экранирование и астатическое построение измерительной системы (прибор снабжают двумя совершенно одинаковыми измерительными элементами, расположенными таким образом, чтобы магнитные поля соответствующих катушек имели противоположные направления).

Погрешность от изменения окружающей температуры и частоты измеряемого тока в электромагнитных приборах незначительна.

Приборы электромагнитной системы применяют в качестве амперметров и вольтметров.

Достоинствами электромагнитных приборов являются:

- 1) простота конструкции,
- 2) пригодность для измерений больших токов без вспомогательных приспособлений (шунтов, трансформаторов тока),
- 3) стойкость при перегрузках, тродинамической системы будут показывать действующие значения измеряемых величин.

Приборы электродинамической системы являются наиболее точными. Погрешность от изменения окружающей температуры и частоты измеряемого тока в них незначительна.

Однако внешнее магнитное поле, искажающее собственное поле катушки, оказывает некоторое влияние и на показания электродинамических приборов. Поэтому предосторожности, о которых говорилось при работе с приборами электромагнитной системы, следует соблюдать и во время пользования электродинамическими приборами.

Электродинамические приборы используются в качестве | амперметров и вольтметров, при этом в первом случае предпочитают параллельное соединение, подвижной и неподвижной катушек, а во втором - последовательное.

Приборы электродинамической системы отличаются значительным потреблением мощности, составляющим в среднем 5—10 *вт* у амперметров и 7—15 *вт* у вольтметров (с пределами измерения до 300 *в*).

Достоинства электродинамических приборов заключаются и в большой точности и пригодности для постоянного и переменного токов.

Недостатками приборов этой системы являются:

- 1) зависимость показаний от внешних магнитных полей,
- 2) чувствительность к перегрузкам,
- 3) большая мощность,
- 4) неравномерность шкалы,
- 5) высокая стоимость.

## Лабораторная работа № 7. Определение времени релаксации RC – цепи.

**Цель работы:** Определение времени релаксации RC – цепи.

**Принадлежности:** RC – цепь, секундомер

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до 1000В и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание и сдать преподавателю соединительные провода.

### Краткая теория.

Простейшая RC – цепь состоит из конденсатора емкостью C и резистора сопротивлением R, подключающихся к источнику питания  $\mathcal{E}$ . Принципиальная электрическая схема RC – цепи изображена на рис. 1.

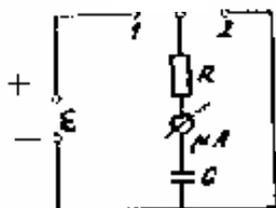


рис. 1

В положении 1 переключателя П, конденсатор через резистор R заряжается от источника  $\mathcal{E}$  до разности потенциалов  $\Delta\varphi$ . При переводе переключателя П в положение 2 конденсатор разряжается через этот же резистор. В схему также подключен микроамперметр, позволяющий измерять ток разряда I в различные моменты времени t. Известно, что сила тока разряда I определяется законом Ома

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = -\frac{\Delta\varphi}{R}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi = \frac{q}{C}$  – разность потенциалов на конденсаторе при заряде на нем равном Q. Так

как, по определению сила тока  $I = \frac{dq}{dt}$ , то (1) можно записать в виде:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{\Delta\varphi}{R} = -\frac{q}{RC} \quad (2)$$

Полученное дифференциальное уравнение (2) – уравнение с разделяющимися переменными, то есть

$$\frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}$$

Интегрируя это уравнение получим

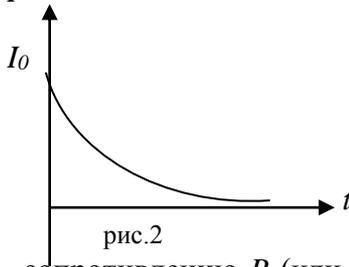
$$\ln q = -\frac{1}{RC} \cdot t + \ln C$$

Учитывая, что в начальный момент времени  $t=0$  заряд на конденсаторе был равен  $q_0$ , то потенцируя последнее выражение найдем, что заряд на конденсаторе убывает со временем по экспоненциальному закону:

$$q = q_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

Так как  $I = \frac{dq}{dt}$ , то и ток разряда конденсатора  $C$  через сопротивление  $R$  будет

экспоненциально убывающим



$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

где  $I_0$  – значение тока разряда в начальный момент времени (рис.2).

При  $t = \tau = R \cdot C$  сила тока  $I$  убывает в  $e$  раз. Величину  $\tau$  называют

постоянной времени или временем релаксации  $RC$  – цепи. Зная  $\tau$ ,

можно измерить неизвестную емкость  $C$  по известному

сопротивлению  $R$  (или наоборот определить  $R$  по известному  $C$ ). Целью настоящей работы

является измерение времени релаксации  $\tau$ ,  $RC$ -цепи и определение по нему неизвестного

сопротивления  $R$  по известной емкости  $C$ . Для этого нужно снять зависимость тока разряда  $I$

от времени  $t$ . Зафиксировав какие-либо два значения времени  $t_1$  и  $t_2$  из (4) имеем

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{-\frac{(t_1 - t_2)}{\tau}} \quad (5)$$

Откуда следует, что

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} \quad (6)$$

Время релаксации  $\tau$  можно получить и графическим путем. Для этого строят график  $\ln I = \varphi(t)$ . Должна получиться прямая, по тангенсу угла наклона  $K = \operatorname{tg} \alpha$  которой определяют  $\tau$ . Очевидно

$$\tau = \frac{1}{K} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (7)$$

Зная  $\tau$  по известной емкости  $C$  для данной  $RC$ -цепи определяют сопротивление

$$R = \frac{\tau}{C} \quad (8)$$

### Выполнение работы

1. Подключить к источнику питания  $RC$ -цепь.
2. Установить переключатель в положение разряда, измерить зависимость силы тока  $I$  от времени. Показания амперметра отмечают через каждые 15 сек. В течение первых 1,5 мин., и через 30 сек. Вплоть до убывания тока до нуля.
3. Построить графики  $I=f(t)$  и  $\ln I = \varphi(t)$ .
4. Для любой пары  $t_1$  и  $t_2$  (взять не менее трёх пар) по формуле (6) вычислить значения  $\tau$ .

5. Вычислить среднее арифметическое значение  $\tau_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}$

6. По графику  $\ln I = \varphi(t)$  определить значение  $\tau$  и сравнить его с  $\tau_{cp}$ .
7. Вычислить неизвестные сопротивления  $R$  цепи по известной емкости  $C$ .
8. Оцените погрешности проведенных измерений.

### Контрольные вопросы

1. Объясните экспоненциальный характер убывания заряда конденсатора  $Q$  со временем  $t$ . Выведите формулу (3).
2. Получите формулу (4) из (3). Выразите  $I_0$  через  $Q_0$ ,  $R$  и  $C$ .
3. Выведите формулу (7), связывающую  $\tau$  и тангенс угла наклона прямой  $y = \varphi(t)$ .

### Лабораторная работа № 8. Измерение сопротивления с помощью моста Уитстона.

**Цель работы:** познакомиться с мостовой схемой измерения сопротивлений, измерить сопротивления отдельных резисторов соединенных последовательно и параллельно.

**Принадлежности:** мост Уитстона, набор сопротивлений, магазин сопротивлений, гальванометр, источник постоянного тока.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до  $1000V$  и требования безопасности для физической лаборатории.

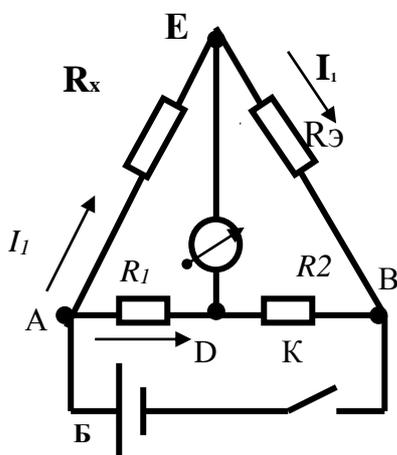
2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание и сдать преподавателю соединительные провода.

#### Краткая теория

Мост Уитстона предназначен для измерения сопротивлений. Он состоит из двух резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , чувствительного гальванометра  $G$ , двух резисторов – эталонного  $R_э$  и неизвестного  $R_x$  (рис.1). Рассмотрим схему при условии, что по участку  $ED$  ток не протекает. Замкнём ключ  $K$ , тогда по участку  $AB$  потечёт ток и вдоль него будет наблюдаться падение потенциала от величины  $\varphi_A$  (в точке  $A$ ) до величины  $\varphi_B$  (в точке  $B$ ). В цепи  $AEB$  пойдет ток  $I_1$  и будет наблюдаться падение потенциала от  $\varphi_A$  до  $\varphi_E$  (на резисторе  $R_x$ ) и от  $\varphi_E$  до  $\varphi_B$  (на резисторе  $R_э$ ). Очевидно, потенциал в точке  $E$  имеет значение  $\varphi_E$  промежуточное между значениями  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$ . Поэтому подбором резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_э$  всегда можно добиться, того что в точке  $D$  потенциал  $\varphi_D$  будет равен потенциалу  $\varphi_E$ :  $\varphi_D = \varphi_E$ . Если между точками  $D$  и  $E$  включен гальванометр  $G$ , то в этом случае ток через него не пойдет, т.к.



$$\varphi_E - \varphi_D = 0.$$

Такое положение называется равновесием моста. Покажем, что условие равновесия определяется соотношением:

$$\frac{R_x}{R_э} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Действительно, на основании второго закона Кирхгофа для любого замкнутого контура сумма падений напряжений равна сумме электродвижущих сил, действующих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i \cdot R_i = \sum_{j=1}^k \mathcal{E}_j \quad (2)$$

Запишем эти уравнения для контуров  $AED$  и  $BED$  при равновесии моста, т. е. при отсутствии тока на участке  $ED$ .

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_x - I_2 \cdot R_1 = 0 \\ I_1 \cdot R_3 - I_2 \cdot R_2 = 0 \end{cases}$$

Из этих уравнений легко получаем соотношение (1).

Откуда:

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

Зная, что  $R_1=270$  Ом,  $R_2=47,6$  Ом и подбирая  $R_3$ , найдем  $R_x$ .

### Выполнение работы

1. Собрать схему (рис. 1).
2. Подобрать на магазине сопротивлений такое сопротивление  $R_3$  при котором ток через гальванометр равен нулю.
3. Вычислить  $R_{x1}$  по формуле (3)
4. Повторить измерения для второго сопротивления  $R_{x2}$ , и для третьего  $R_{x3}$ .
5. Измерить сопротивления при последовательном и параллельном соединении  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$  и  $R_{x3}$  и проверяют формулы для последовательного и параллельного соединения сопротивлений:

$$R_{\text{посл}} = R_{x_1} + R_{x_2} + R_{x_3}$$

$$\frac{1}{R_{\text{парал}}} = \frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} + \frac{1}{R_{x_3}}$$

6. Вычислить погрешность измерений.
7. Записать окончательный результат.

### Контрольные вопросы

1. Сформулировать правила Кирхгофа.
2. Вывести условия равновесия моста используя правила Кирхгофа.
3. Изменится ли условие равновесия моста, если гальванометр и источник тока поменять местами?

### Лабораторная работа № 9. Исследование электрической цепи постоянного тока.

**Цель работы** – изучение зависимости силы тока, напряжения, полной полезной мощности и к.п.д. источника от сопротивления нагрузки.

**Приборы и принадлежности** – источник постоянного тока, реостат для искусственного увеличения внутреннего сопротивления источника, нагрузочный реостат миллиамперметр, вольтметр.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до  $1000V$  и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание и сдать преподавателю соединительные провода.

#### 1. Краткая теория.

Любая электрическая цепь состоит из источника и потребителя энергии, а также различных регулировочных устройств и измерительных приборов.

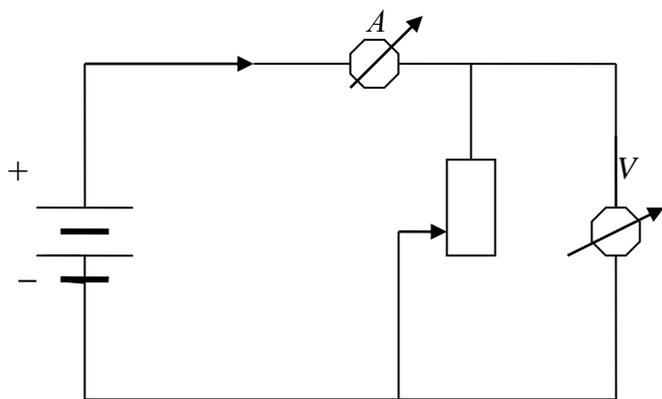


Рис.1

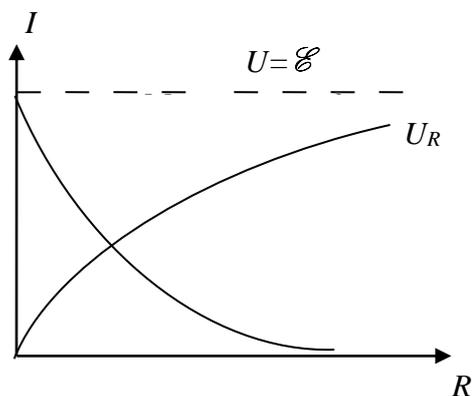


Рис.2.

На рис. 1 представлена простейшая цепь, состоящая из источника постоянного тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  и нагрузочного реостата  $R$ . Для измерения силы тока и

напряжения на нагрузке в цепь включены амперметр  $A$  и вольтметр  $V$ . В такой цепи сила тока, напряжение на нагрузке, полная и полезная мощности оказываются зависимыми от величины нагрузки. Сила тока, например, убывает с ростом сопротивления нагрузки в соответствии с известным законом Ома.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (1)$$

Очевидно, наибольший ток будет в случае короткого замыкания, т.е. при  $R=0$ . Его величина  $I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$  (рис. 2)

Из (1) легко получаем

$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r = U_R + U_r, \quad (2)$$

где  $U_R = I \cdot R$  и  $U_r = I \cdot r$  - падения напряжения (или просто напряжения) на внешнем и внутреннем участках цепи соответственно.

Принимая во внимание закон Ома (1), получаем из (2) зависимость напряжения  $U_R$  от сопротивления нагрузки  $R$ :

$$U_R = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \cdot R = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{r}{R}} \quad (3)$$

Отсюда видно, что с ростом сопротивления нагрузки напряжение на ней возрастает, асимптотически приближаясь к величине ЭДС при  $R \rightarrow \infty$  (рис. 2)

При прохождении электрического тока в цепи происходит выделение полной мощности

$$P = I \cdot \mathcal{E}, \quad (4)$$

при этом мощность, выделяемая на нагрузке

$$P_R = I \cdot U_R, \quad (5)$$

является полезной мощностью.

Из (4) видно, что полная мощность, развиваемая источником, зависит от сопротивления нагрузки  $R$  так же как и сила тока  $I = I(R)$ . Она максимальная при коротком замыкании ( $R=0$ )

$$P_{кз} = I_{кз} \cdot \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}^2}{r} \quad (6)$$

но в этом случае выделяется в самом источнике и оказывается бесполезной, а зачастую вредной, вызывая выход источника из строя. С ростом  $R$  полная мощность убывает, стремясь к нулю при  $R \rightarrow \infty$  (рис. 3).

Зависимость полезной мощности, выделяемой на нагрузке, от  $R$  определяется выражением

$$P_R = I \cdot U_R = I^2 \cdot R = \frac{\mathcal{E}^2}{(R+r)^2} \cdot R \quad (7)$$

Анализ выражения (7) показывает, что зависимость  $P_R = P_R(R)$  должна иметь максимум, так как  $P_R = 0$  в предельных случаях: при коротком замыкании ( $R=0$ ) и при

$R \rightarrow \infty$ .

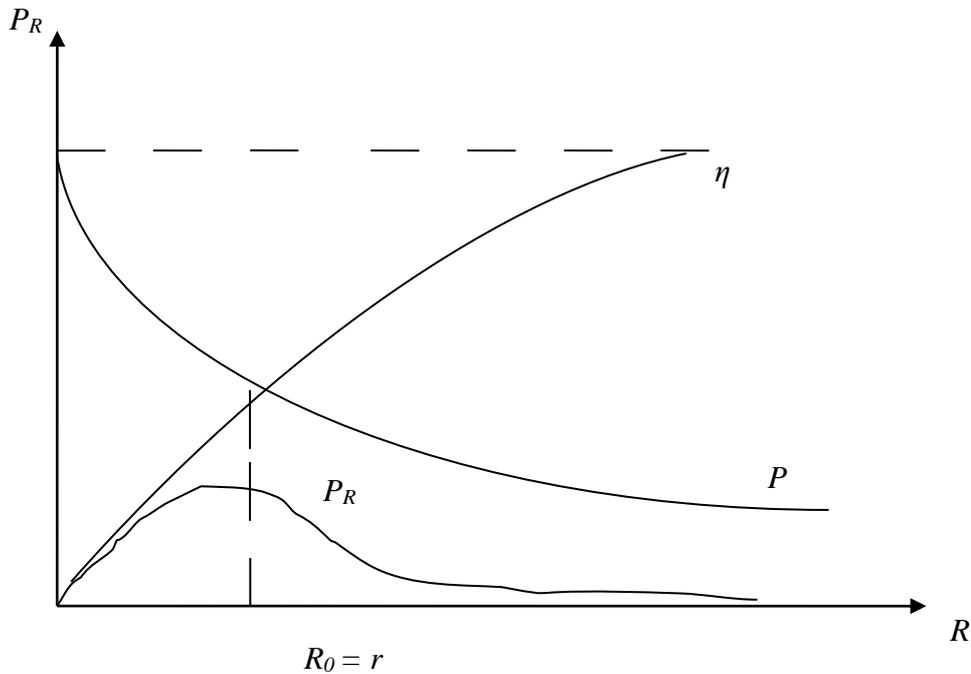


Рис.3

Найдем значение  $R_0$ , при котором полезная мощность, отбираемая от источника, будет наибольшая. Для этого продифференцируем формулу (7) и приравняем производную нулю

$$\frac{dP_R}{dR} = \mathcal{E}^2 \cdot \frac{(R+r) \cdot [(R+r) - 2R]}{(R+r)^4} = 0 \quad (8)$$

Отсюда находим, что  $P_R$  – максимальна при  $R_0 = r$ , т.е. когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника (рис.3). При этом напряжение на нагрузке равно половине ЭДС, т.е.  $U_{R_0} = \frac{\mathcal{E}}{2}$ , а сила тока – половине силы тока короткого замыкания  $I_{R_0} = \frac{I_{кз}}{2}$ . Полезная мощность, в этом случае, составляет четверть мощности короткого замыкания.

Отношение полезной мощности ко всей мощности, развиваемой источником в цепи, определяет коэффициент полезного действия (к.п.д.)  $\eta$  источника.

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{I \cdot U_R}{I \cdot \mathcal{E}} = \frac{U_R}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r} \quad (9)$$

Из этой формулы следует, что  $\eta$  будет тем больше, чем больше сопротивление нагрузки  $R$ . При  $R=0$ ,  $\eta=0$  и асимптотически стремится к  $\eta=1$  при  $R \rightarrow \infty$ . При  $R=r$ ,

т.е. при максимальной полезной мощности к.п.д. источника  $\eta = \frac{1}{2}$ , т.е. составляет 50%

Именно исследование этих закономерностей является целью работы. Необходимо получить экспериментальные зависимости силы тока  $I$ , напряжения  $U_R$ , полной  $P$  и полезной  $P_R$ , а так же к.п.д.  $\eta$  от величины сопротивления нагрузки.

## II. Описание лабораторной установки.

Рабочая схема изображена на рис. 4. В качестве источника используется выпрямитель, дающий напряжение величиной несколько вольт. Внутреннее сопротивление таких источников, как правило, мало – порядка десятых долей Ома. Поэтому, как следует из вышеизложенного, для построения графиков искомых зависимостей нагрузочный реостат  $R$  тоже должен иметь сопротивление порядка десятых долей Ома. Подобные реостаты являются уникальными. Поэтому внутреннее сопротивление источника в данной работе искусственно увеличивается путем последовательного включения дополнительного реостата  $r'$ , имеющего величину нескольких десятков Ом. При этом собственным внутренним сопротивлением  $r$  источника можно пренебречь.

Из схемы (рис.4) следует, что внутреннее сопротивление миллиамперметра и вольтметра составляют с сопротивлением нагрузочного реостата единое целое. Таким образом, левую часть схемы следует рассматривать как источник, а правую как нагрузку.

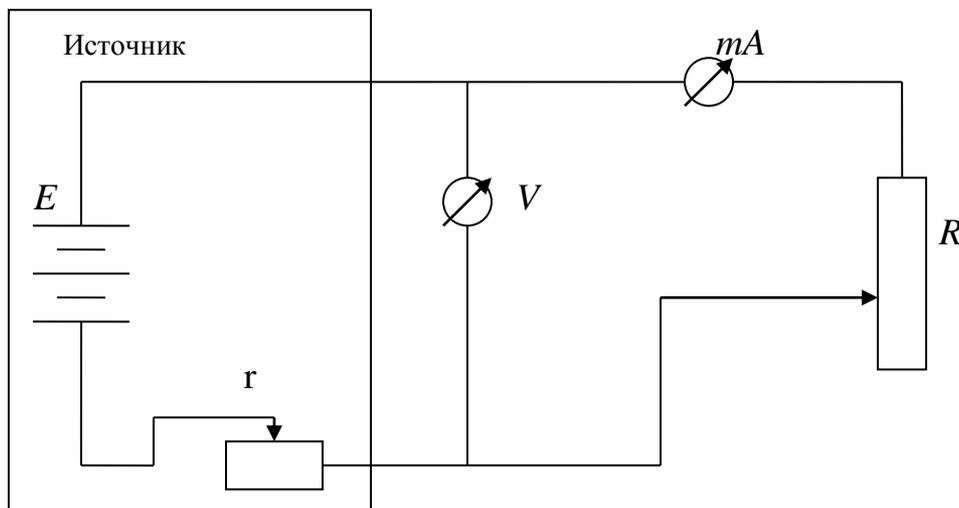


Рис. 4

## Измерение и обработка результатов.

1. Собрать рабочую схему (рис.4). Выяснить параметры приборов. Движки реостатов установить в положение наибольшего значения сопротивления.
2. После проверки схемы преподавателем или лаборантом включить источник питания. Отсчитать показания приборов и занести в таблицу.
3. Далее, уменьшая сопротивление нагрузки  $R$ , снять 8-10 значений тока в цепи  $I$  и напряжения  $U_R$ . Последняя точка должна соответствовать короткому замыканию. При этом ток должен равняться  $I_{кз}$ , а напряжение должно обратиться в нуль. Выключить схему.

4. Определив цены делений на использованных пределах измерений амперметра и вольтметра вычислить и занести в таблицу значения тока в амперах и напряжения в вольтах.

5. Разделив полученные значения напряжения на соответствующие значения тока рассчитать и занести в таблицу сопротивление нагрузки  $R$

Таблица 1.

$N$	$I$	$U_R$	$R = \frac{U_R}{I}$	$P = I \cdot \mathcal{E}$	$P_R = IU_R$	$\eta = \frac{P_R}{P}$
	$A$	$B$	$Ом$	$Bm$	$Bm$	

6. Величину ЭДС  $E$  следует считать известной, либо измерить значение  $E$  при отключенной нагрузке.

7. По формулам (4,5,9) рассчитать значения полезной  $P_R$ , полной  $P$  мощности и к.п.д.  $\eta$ , соответствующие найденным величинам  $R$ .

8. По полученным значениям построить кривые  $I = I(R)$ ,  $U_R = U_R(R)$  на одном графике и  $P = P(R)$ ,  $P_R = P_R(R)$  и  $\eta = \eta(R)$  на другом.

9. Отметить на первом графике сопротивление  $R_0 = r$ , при котором ток и напряжение составляют, соответственно, половину тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и половину  $\mathcal{E}$ . На втором графике найти  $R_0 = r$  по максимуму зависимости  $P_R = P_R(R)$ . Сравнить между собой эти значения  $R_0$ . Примерное равенство между этими двумя значениями  $R_0$  является критерием правильности выполненных измерений. Если такого равенства нет, измерения следует проделать вновь.

### Контрольные вопросы.

1. Что такое ЭДС?
2. Запишите закон Ома в обобщенной форме и для замкнутой цепи.
3. Проведите математическое исследование функций  $U_R(R)$  и  $I(R)$ .
4. Дайте определение мощности электрического тока.
5. Проведите исследование зависимости  $P_R = P_R(R)$ .
6. Что такое к.п.д. источника?

## Лабораторная работа № 10. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

**Цель работы:** определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

**Принадлежности:** тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник тока.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до 1000В и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание и сдать преподавателю соединительные провода.

### Краткая теория.

Земля в целом представляет собой огромный шаровой магнит. Поэтому в любой точке пространства, окружающего Землю, и на ее поверхности существует магнитное поле, силовые линии которого изображены на рисунке 1. При этом северный магнитный полюс N находится вблизи южного географического Ю и наоборот. На экваторе магнитные силовые

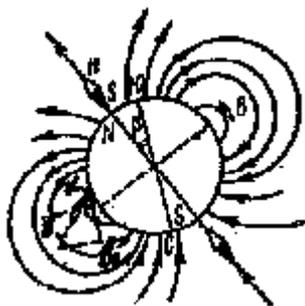


Рис. 1

линии направлены горизонтально, а на полюсах – вертикально. В остальных точках земной поверхности индукция магнитного поля направлена под некоторым углом к плоскости Земли, т.е. имеет и горизонтальную  $B_z$  и вертикальную  $B_v$  составляющие. Направление горизонтальной составляющей принимается за направление магнитного меридиана, т.к. в этом направлении устанавливается стрелка компаса, вращающаяся в горизонтальной плоскости. Целью настоящей работы является измерение величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра. Тангенс-гальванометр представляет собой вертикально расположенные  $n$  круговых витков радиуса  $R$ , по которым пропускается постоянный ток силой  $I$ . В центре этой совокупности витков (короткой катушки) помещается компас. При отсутствии тока в витках магнитная стрелка компаса установится по

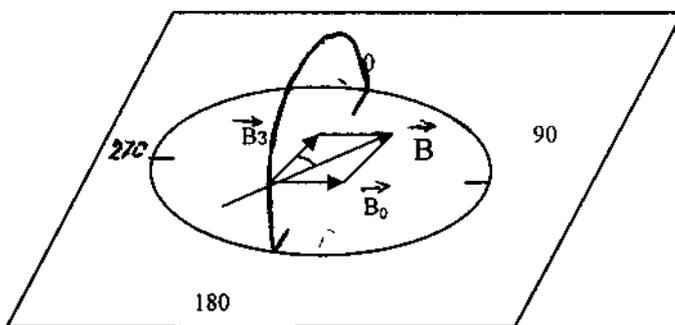


рис.2.

магнитному меридиану. При пропускании тока по виткам стрелка повернется на некоторый угол  $\alpha$ , т.к. теперь на нее помимо горизонтальной составляющей магнитного поля Земли будет действовать еще магнитное поле, создаваемое током  $I$  в  $n$  витках.

Если витки сориентировать так чтобы их плоскости совпадали с плоскостью магнитного меридиана, то на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных поля: поле Земли  $B_3$  и поле тока  $B_0$  (рис.2).

Стрелка компаса установится в направлении равнодействующей этих полей, вдоль  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_3$ , т.е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут  $B_0$  и  $B_3$ . См. рис.2, на котором изображено сечение витков с током, ориентированных вдоль магнитного меридиана, горизонтальной плоскостью. Из рис. 2 следует, что  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_0}{B_3}$ , откуда

$$B_3 = \frac{B_0}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (1)$$

Так как индукция магнитного поля в центре кругового тока  $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R}$ , то в центре  $n$  витков, очевидно

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2R} \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) получим

$$B_3 = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (3)$$

Эта формула используется в настоящей работе для опытного определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Формула (3) записана в системе СИ, поэтому  $B_3$  получится в теслах.

Электрическая схема установки для измерения  $B_3$  состоит из тангенс-гальванометра  $G$ , источника тока  $\mathcal{E}$ , реостата  $R$  и амперметра  $A$  для регулировки и измерения тока (рис.3).

В схеме используется переключатель  $\Pi$  для изменения направления тока, проходящего через тангенс-гальванометр.

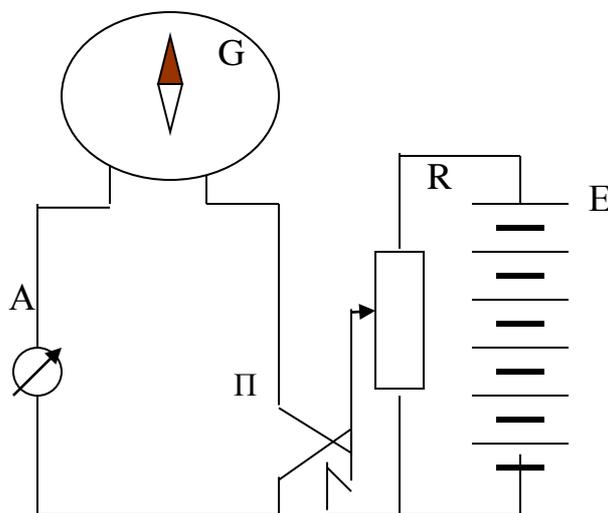


рис. 3

### Выполнение работы.

1. Собирают электрическую цепь по схеме рис.3
2. Поворачивая тангенс- гальванометр, устанавливают его плоскость в плоскости магнитного меридиана, так чтобы магнитная стрелка установилась в направлении  $0^\circ-180^\circ$ .
3. Устанавливая движком реостата заданную величину тока (задается преподавателем) измерить угол отклонения магнитной стрелки  $\alpha_1$ .
4. Не изменяя величину тока поменять переключателем  $\Pi$  направление тока на противоположное. Отсчитать новый угол отклонения стрелки  $\alpha_2$ . Вычислит  $\alpha_{cp} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}$ .
5. Повторить измерения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  при нескольких других заданных значениях тока.
6. Подставляя последовательно измеренные соответствующие значения тока  $I_i$  и усредненные значения угла  $\alpha_i$  в формулу (3) найти значения  $B_3$ . ( Величины  $n$  и  $R$  указаны на тангенс-гальванометре).
7. Все результаты измерений и вычислений занести в табл.1

Табл.1

$I(A)$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_{cp}$	$tg\alpha_{cp}$	$B_3$	$\Delta B$	$\delta B$
(ср)							

8. Оценить погрешность проведенного измерения  $B_3$  и результаты занести в табл.1
9. Записать результат в виде  
$$B_3 = B_{3cp} \pm \Delta B_{3cp}$$

### Контрольные вопросы

1. Какой вид имеет магнитное поле Земли?
2. В чем заключается идея измерения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли?
3. Как устроен тангенс-гальванометр?
4. Выведите формулу индукции  $B_0$ , в центре кругового витка с током.
5. Почему плоскость тангенс-гальванометра следует ориентировать в направлении магнитного меридиана?

## Лабораторная работа № 11. Исследование колебаний в колебательном контуре

### Тема работы. Исследование колебаний в колебательном контуре

**Цель работы.** Изучение затухающих электрических колебаний в колебательном контуре.

**Формируемые компетенции.** Владеет способностью применять соответствующий физико-математический аппарат при решении профессиональных задач.

### Теоретическая часть.

Простой колебательный контур состоит из последовательно соединенных элементов: емкости  $C$ , индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$

Среди различных электрических явлений большой интерес представляют электрические колебания, при которых некоторые электрические величины, такие как потенциал, сила тока, или заряд изменяются во времени. Одним из простейших источников получения электрических колебаний является электрический колебательный контур.

Рассмотрим простой колебательный контур, состоящий из последовательно соединенных конденсатора  $C$ , индуктивности  $L$ , резистора  $R$  и ключа  $K$  (рис.1, а). Если конденсатор зарядить, а затем замкнуть ключ (рис.1,б), то конденсатор начинает разряжаться. В цепи появляется возрастающий ток  $i$ , в катушке индуктивности – соответствующее магнитное поле.

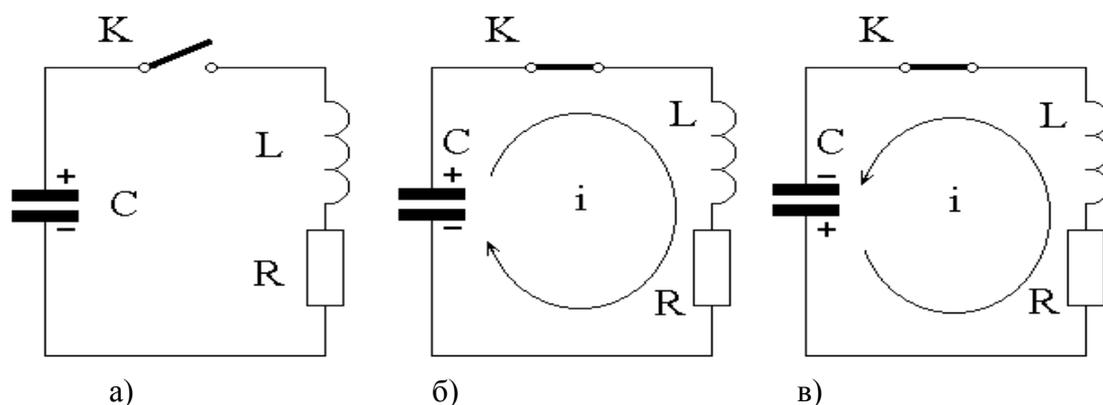


Рис.1.

Ток разряда конденсатора  $i$ , протекая через катушку, порождает в ней ЭДС самоиндукции. Возникающая ЭДС самоиндукции замедляет разряд конденсатора, а после того, как конденсатор полностью разрядится ЭДС самоиндукции, наоборот, начинает поддерживать ток в прежнем направлении.

В результате этого конденсатор перезарядится, после чего процесс повторится, но движение зарядов будет происходить в противоположном направлении (рис.2,в).

Первоначальная энергия электрического поля заряженного конденсатора во время его разряда переходит в энергию магнитного поля катушки. При перезаряде конденсатора происходит обратный переход энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора. В идеальном колебательном контуре сопротивление  $R$  равно нулю и возникшие электрические колебания будут **незатухающими** (рис. 2,а).

В реальном колебательном контуре  $R$  отлично от нуля, поэтому при протекании тока через него происходит выделение тепла. Вследствие этого общий запас энергии в контуре уменьшается, и колебания **затухают** (рис.2,б).

С увеличением сопротивления  $R$  скорость затухания колебаний увеличивается (рис. 2,в), а при достаточно большом значении  $R$  колебания вообще не возникают - наблюдается **апериодический** разряд конденсатора (рис. 2,г).

Сопротивление контура, при котором колебательный процесс переходит в

апериодический, называется критическим ( $R_{кр}$ ).

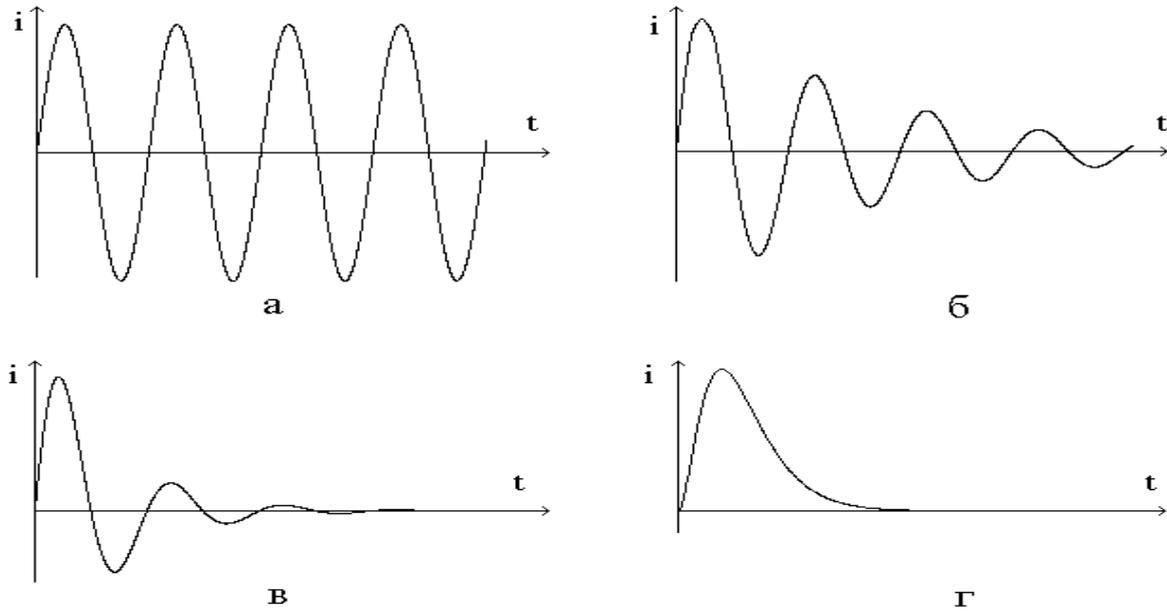


Рис. 2.

Найдем уравнение, описывающее затухающие электрические колебания в контуре. В соответствии с законом сохранения энергии убыль энергии конденсатора при его разряде  $-dW_C$  расходуется на увеличение энергии магнитного поля катушки  $dW_L$  и выделение тепла  $dQ$  в сопротивлении  $R$ :

$$-dW_C = dW_L + dQ, \quad (1)$$

где  $W_C$  – энергия конденсатора,  $W_C = q^2 / 2C$ ,

$W_L$  – энергия магнитного поля катушки,  $W_L = Li^2 / 2$ .

Здесь  $q$  – заряд конденсатора в данный момент времени,  $i$  – сила тока в контуре в этот же момент.

Количество тепла, выделяющееся в проводнике за время  $dt$ :

$$dQ = i^2 R dt.$$

Используя эти соотношения, преобразуем уравнение (1):

$$\begin{aligned} -d\left(\frac{q^2}{2C}\right) &= d\left(L \frac{i^2}{2}\right) + i^2 \cdot R \cdot dt = 0, \\ \frac{1}{2C} 2q \cdot dq + \frac{L}{2} \cdot 2i \cdot di + i^2 R \cdot dt &= 0, \\ \frac{q}{C} dq + L \cdot i \cdot di + i^2 R \cdot dt &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как  $i = dq/dt$  и  $dq = i dt$ ,

то выражение (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{d}{C}dq + L \frac{dq}{dt} di + iR \cdot dq = 0.$$

Сократив на dq и используя соотношение

$$\frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2},$$

получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (3)$$

В этом уравнении сделаем следующие замены:

$$\frac{R}{L} = 2\beta, \quad (4)$$

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad (5)$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания,  $\omega_0$  – собственная частота контура.  
Тогда

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение (6) имеет (при  $\beta < \omega_0$ ) следующее решение:

$$q = q_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega t + \alpha), \quad (7)$$

где

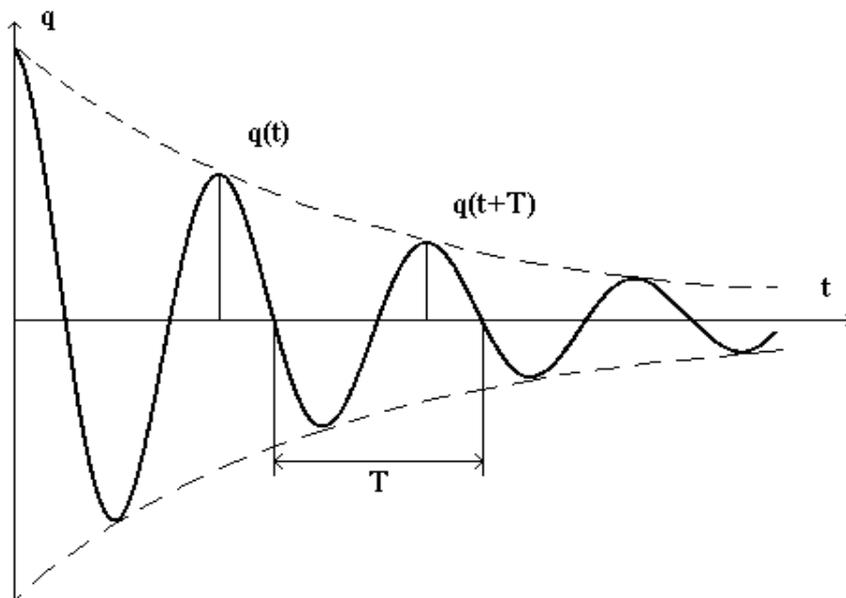
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (8)$$

$q_0$  и  $\alpha$  – некоторые постоянные, соответствующие начальной амплитуде и начальной фазе колебания.

Выражение (11.7) есть уравнение затухающих электрических колебаний, циклическая частота которых равна  $\omega$ , а амплитуда экспоненциально убывает с течением времени (рис. 3).  
Период этих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (9)$$

Рис. 3.



Для малых значений  $R$  получим

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (10)$$

В соответствии с уравнением (9) при увеличении сопротивления контура  $R$ , период колебаний будет, стремясь к бесконечности при

$$\beta = \omega_0. \quad (11)$$

Это означает, что колебательный процесс переходит в апериодический. Используя уравнения (4) и (5) из выражения (11) можно получить значение критического сопротивления:

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (12)$$

Для характеристики затухания колебаний часто пользуются *логарифмическим декрементом затухания*  $\delta$  и *добротностью*  $Q$ .

Логарифмический декремент затухания равен натуральному логарифму отношения амплитуд колебаний, соответствующих двум моментам времени, отличающимся на период:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (13)$$

Здесь  $A$  – амплитуда колебаний величины заряда, тока или напряжения (рис. 3). Используя уравнение (7), получим

$$\delta = \ln \frac{q_0 e^{-\beta t}}{q_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T.$$

Для небольших значений  $R$ , с учетом уравнений (4) и (10), логарифмический декремент затухания можно определить через параметры контура:

$$\delta = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (14)$$

Пусть  $\tau$  – время релаксации, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e \cong 2.7$  раз,  $N_e$  – число колебаний совершенных за время релаксации. Тогда можно легко доказать, что

$$\delta = \frac{1}{N_e} \quad (15)$$

Добротность  $Q$  представляет собой умноженное на  $2\pi$  отношение энергии  $W(t)$  в данный момент времени  $t$ , к энергии, теряемой за период колебания  $T$ :

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}, \quad (16)$$

Если в начальный момент времени ( $t = 0$ ) энергия контура состоит из энергии заряженного конденсатора, то

$$W(t) = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (17)$$

Энергия контура через время, равное периоду, уменьшится в соответствии с уменьшившимся зарядом:

$$W(t+T) = \frac{(q_0 e^{-\beta T})^2}{2C}. \quad (18)$$

Подставив выражения (17) и (18) в уравнение (16), получим

$$Q = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\beta T}} = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\delta}}. \quad (19)$$

Известно соотношение  $e^x \approx 1+x$ , выполняющееся для малых значений  $x$ : ( $x \ll 1$ ). С учетом этого выражение (19) упростится:

$$Q = \frac{\pi}{\delta}. \quad (20)$$

Добротность можно выразить и через параметры контура, применив формулу (14):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (21)$$

Из уравнений (20) и (15) следует также, что добротность пропорциональна числу колебаний в контуре, совершившихся за время релаксации, в течение которого амплитуда уменьшается в  $e$  раз:

$$Q = \pi N_e.$$

В ряде случаев колебательный процесс можно исследовать, изучая взаимозависимость между напряжением  $u$  и током  $i$  в контуре.

График, изображающий эту зависимость, называется фазовой кривой. Состояние колебательной системы для любого момента времени изобразится точкой на этой кривой (рис. 4).

Уравнение фазовой кривой можно получить, используя зависимости тока и напряжения от времени.

Из выражения (7) и соотношения  $u=q/C$  следует, что

$$u = \frac{q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha).$$

Сделаем замену  $U_0 = q_0 / C$ , и получим зависимость напряжения на конденсаторе от времени:

$$u = U_0 \cdot e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (22)$$

где  $U_0$  – начальная разность потенциалов.

Из уравнения (7) можно определить и зависимость тока в контуре от времени

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} [q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)] = \\ &= q_0 e^{-\beta t} [-\omega \cdot \sin(\omega t + \alpha) - \beta \cdot \cos(\omega t + \alpha)] \end{aligned}$$

Для малых затуханий  $\beta \ll \omega$ , тогда

$$i = -q_0 \cdot \omega \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega t + \alpha).$$

Обозначим  $I_0 = q_0 \cdot \omega$ , тогда  $i = -I_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha)$ , то есть

$$i = I_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}). \quad (23)$$

Сравнив выражения (22) и (23), можно увидеть, что колебания силы тока опережают по фазе на  $\frac{\pi}{2}$  колебания напряжения на конденсаторе.

Преобразуем выражения (22) и (23) следующим образом:

$$\frac{u}{U_0} = e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha),$$

$$\frac{i}{I_0} = -e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha).$$

Если возвести эти уравнения в квадрат и сложить, то получим уравнение фазовой кривой:

$$\left(\frac{i}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{u}{U_0}\right)^2 = e^{-2\beta t}. \quad (24)$$

В случае незатухающих колебаний ( $R = 0, \beta = 0$ ) фазовая кривая имеет форму эллипса (рис. 4,а). Для реального контура ( $R \neq 0, R < R_{кр}$ ) фазовая кривая представляет собой скручивающуюся спираль, причем большему сопротивлению контура соответствует большее затухание (рис. 4,б и рис.4,в).

При апериодическом колебании, когда сопротивление контура больше критического ( $R > R_{кр}$ ), фазовая кривая вырождается в линию, изображенную на рис. 4,г.

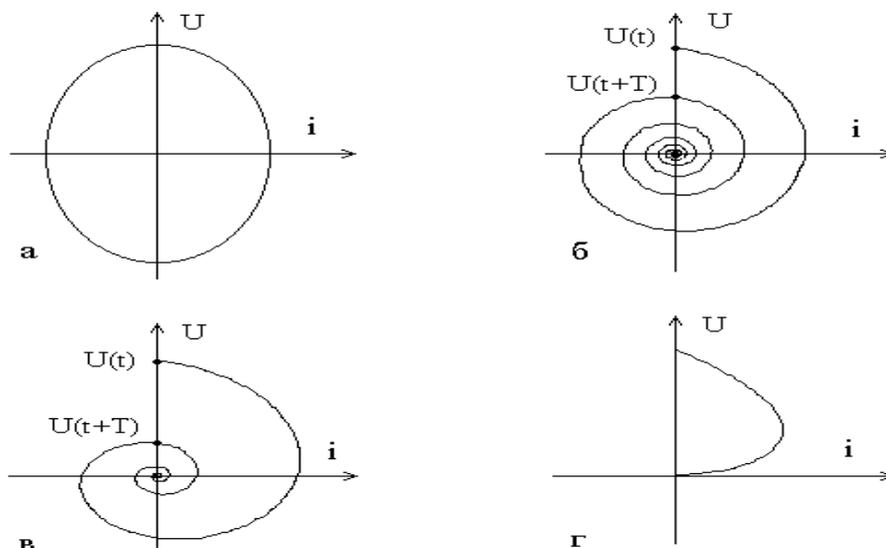


Рис.4.

### **Оборудование и материалы.**

Лабораторная установка состоит из осциллографа и стенда, содержащего две катушки индуктивности, два конденсатора, магазин сопротивлений и генератор импульсов.

Генератор вырабатывает короткие положительные импульсы, в результате этого конденсатор колебательного контура периодически получает некоторый электрический заряд. В промежутках времени между импульсами в контуре будут совершаться затухающие колебания. Графики этих колебаний можно будет наблюдать на экране осциллографа и, далее, по ним определять период, логарифмический декремент затухания, добротность, критическое сопротивление.

Необходимые для расчетов параметры элементов контура указаны на стенде.

### **Указания по технике безопасности.**

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, изучившие правила техники безопасности.
2. Лабораторные работы могут проводиться только под руководством и наблюдением преподавателя.
3. При выполнении лабораторных работ студентам запрещается:
  - включать схемы под напряжением без проверки преподавателя;
  - прикасаться к незащищённым изоляцией частям схемы, находящихся под напряжением;
  - определять наличие напряжения на элементах цепи при помощи пальцев; проверка наличия напряжения производится только с помощью вольтметра и в присутствии преподавателя;
  - при работе на лабораторной установке прикасаться одновременно стен, радиаторов системы отопления и других металлических предметов;
  - включать рубильники, нажимать кнопки, прикасаться к электрическому оборудованию, не относящемуся к данной лабораторной работе без ведома преподавателя;
  - производить по ходу выполнения работы переключения в схеме, не обесточив её;
  - бросать соединительные провода на пол и на исследуемую установку;
  - заменять сгоревшие предохранители на рабочих щитах при включённых рубильниках;
  - класть на рабочий стол посторонние предметы;
  - входить в лабораторию в верхней одежде;
  - курить и зажигать огонь.

4. Перед включением схемы обязательно предупредить членов бригады: «Осторожно! Включаю!».
5. При работе на установках, в которых может наблюдаться резонанс, соблюдать особую осторожность.
6. При наличии в схеме конденсаторных батарей, необходимо после отключения питания их разрядить под наблюдением преподавателя.
7. При обнаружении каких – либо неисправностей, исчезновения напряжения в сети, а также при несчастном случае, немедленно прекратить работу, отключить установку от электропитания и сообщить преподавателю.
8. Помнить, что при отключении цепей постоянного тока с индуктивностью возможно кратковременное резкое повышение напряжения.
9. Студенты, нарушившие правила техники безопасности, не допускаются к дальнейшей работе в лаборатории и привлекаются к ответственности.

**Задания.**

1. Собрать схему согласно рис. 5. Сопротивление магазина  $R_M$  сделать равным нулю. Индуктивность и емкость контура выбрать произвольно, внести их параметры в табл. 11.1.

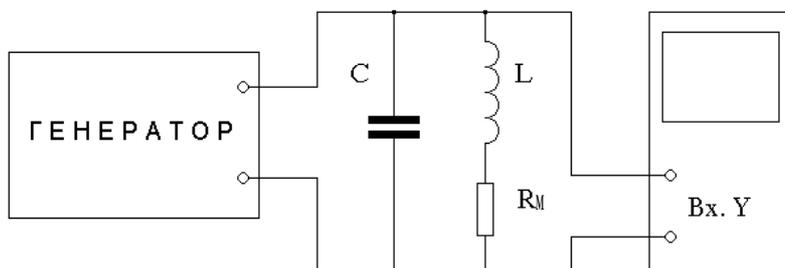


Рис. 5.

2. Включить осциллограф, прогреть его в течение 1-2 минут. Ручкой “Фокус” хорошо сфокусировать луч, чтобы уменьшить ошибку измерений.
3. Включить генератор. С помощью ручек управления разверткой осциллографа добиться неподвижной картины колебаний так, чтобы обеспечить достаточно точное измерение временных интервалов и амплитуд колебаний.
4. С помощью полученной осциллограммы, аналогичной рис. 3, измерить период колебаний  $T_0$  при минимальном сопротивлении контура, т.е. при  $R_M = 0$ , результат внести в табл. 1 в миллисекундах.  
Для повышения точности можно измерить промежуток времени, соответствующий нескольким периодам колебаний, разделить его на число периодов и, таким образом, определить длительность одного периода.
5. Увеличивая сопротивление магазина  $R_M$ , проследить за возрастанием скорости затухания колебаний и определить критическое сопротивление контура, соответствующее переходу от периодических колебаний к аperiodическим (т.е. переходу осциллограммы от рис. 2,в к рис. 2,г):

$$R_{кр} = R_L + R_M,$$

где  $R_L$  – собственное сопротивление катушки индуктивности. Полученное значение  $R_{кр}$  внести в табл. 1.

6. Уменьшить сопротивление  $R_M$ , например, вдвое от  $R_{кр}$ . В контуре вновь возникнут затухающие периодические колебания. Определить период этих колебаний  $T$  и вместе с полученным значением сопротивления контура ( $R = R_L + R_M$ ) занести в табл. 1. Убедиться в различии периодов колебаний  $T_0$  и  $T$ , соответствующих различным значениям сопротивления контура.

Таблица 1.

№	C, мкФ	L, мГн	R <sub>L</sub> , Ом	T <sub>0</sub> , мс	R <sub>кр</sub> , Ом	R <sub>М</sub> , Ом	R, Ом	T, мс
1								
2								
3								
...								
...								

7. Повторить измерения по пунктам 4 – 6 три раза для различных комбинаций L и C .

8. Для выбранных значений емкости C, индуктивности L, сопротивления R<sub>L</sub> и полного сопротивления контура R, внесенных в табл. 1, вычислить и занести в табл. 2 теоретические значения:

T<sub>0</sub> – по формуле (10); T – по формуле (.9);

R<sub>кр</sub> – по формуле (12); δ – по формуле (14),

Q – по формуле (20).

Таблица 2.

№	T <sub>0</sub> , мс	T, мс	R <sub>кр</sub> , Ом	δ	Q
1					
2					
3					
...					
...					

9. Для произвольных значений L и C исследовать зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления контура. Увеличивая сопротивление контура с помощью магазина сопротивлений R, измерить амплитуды A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub>, которые соответствуют моментам времени, отличающимся на период (рис. 3).

Результаты измерений внести в табл. 3. Подсчитать экспериментальные значения логарифмического декремента затухания δ<sub>э</sub> по формуле (13), по формуле (14) – его теоретические значения δ<sub>т</sub>.

Таблица 3

№	R, Ом	A <sub>1</sub> , мм	A <sub>2</sub> , мм	δ <sub>э</sub>	δ <sub>т</sub>
1					
2					
3					
4					
5					

10. Для наблюдения фазовых кривых собрать схему по рис. 6.

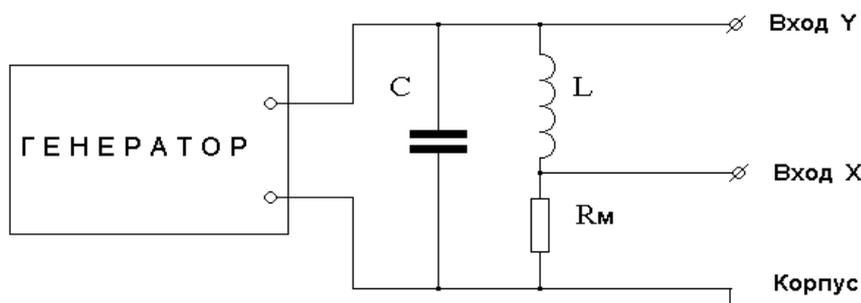


Рис. 6.

При этом на вход X подается сигнал с сопротивления  $R_m$ , который находится в фазе с током в контуре. На вход Y подается сигнал, находящийся в фазе с напряжением. Наблюдая фазовые кривые для различных сопротивлений контура, можно исследовать влияние затухания на форму фазовой кривой и уточнить значение критического сопротивления для данных значений емкости и индуктивности (рис.4,г).

С помощью фазовых кривых можно провести также измерения по п.9 (рис. 4,б).

11. Для одновременного наблюдения осциллограмм колебаний тока и напряжения и определения сдвига фаз между ними собрать схему в соответствии с рис. 7.

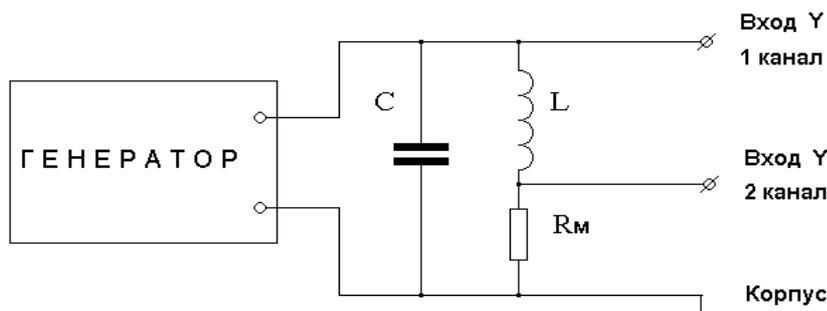


Рис. 7.

На входы Y первого и второго каналов осциллографа подаются сигналы, пропорциональные напряжению и току в контуре. Убедиться в наличии сдвига фаз этих колебаний, оценить величину этого сдвига.

### **Содержание отчета.**

Отчет по лабораторным работам должны содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- конспект основных законов, определений, понятий, формул;
- основное оборудование, схема установки;
- описание по пунктам выполненной работы;
- результаты измерений и расчетов (таблицы, графики);
- оценка погрешностей;
- ответы на контрольные вопросы;
- выводы по результатам выполненной работы, дата, подпись.

### **Контрольные вопросы.**

1. Рассказать об электрических колебаниях в контуре.
2. Дать определение амплитуды, частоты, фазы, периода колебаний.
3. Какой процесс называется апериодическим? Что такое критическое сопротивление? Вывести уравнение (12).
4. Какие превращения энергии имеют место при периодическом и апериодическом процессах?
5. Какие формулы описывают энергию электрического поля конденсатора и энергию магнитного поля катушки.
6. Вывести уравнение затухающих электрических колебаний.
7. Что такое логарифмический декремент затухания? Объяснить его физический смысл, вывести уравнение (15).
8. Пояснить физический смысл добротности контура. Вывести уравнение (20).
9. Что называется фазовой кривой? Получить уравнение этой кривой.

10. Вывести уравнение (7), применив закон Ома для неоднородной замкнутой цепи.
11. Какова величина сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения в идеальном колебательном контуре? Как можно измерить ее в реальных условиях?
12. Рассказать о практическом применении колебательного контура в технике.

### Лабораторная работа № 12. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.

**Цель работы:** изучение движений зарядов в электрических и магнитных полях, измерение удельного заряда электрона.

**Принадлежности:** магнетрон – электрическая лампа 2Ц2С (диод), расположенная внутри соленоида. Универсальный источник питания (УИП-2), выпрямитель Б5-7 с регулируемым напряжением, вольтметр, амперметр, миллиамперметр, реостат.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до  $1000V$  и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание и сдать преподавателю соединительные провода.

#### Краткая теория.

Удельным зарядом частицы называют отношение ее заряда  $Q$  к массе  $m$ . Именно удельным зарядом  $Q/m$  описывается главным образом поведение частицы в электрических и магнитных полях.

В настоящей работе определяется удельный заряд наиболее часто встречающейся в практике частицы-электрона методом магнетрона. Магнетрон- электронный прибор, в котором поток электронов одновременно управляется взаимно – перпендикулярными электрическим и магнитным полями. В современной технике магнетрон используется для генерирования сверхкоротких электромагнитных волн например в радиолокации, СВЧ-технике.

В лабораторной работе в качестве магнетрона используется двухэлектродная лампа с цилиндрическим анодом  $A$  и прямолинейным катодом  $K$ , расположенным на оси анода, помещенная в аксиальное (направленное вдоль оси анода) магнитное поле с индукцией  $B$ ,

созданное достаточно длинным соленоидом  $C$  рис.1 Электроны испускаемые раскаленным катодом под действием электрического поля разностью потенциалов между катодом и анодом при отсутствии магнитного поля движутся по радиальным траекториям (рис.2а).

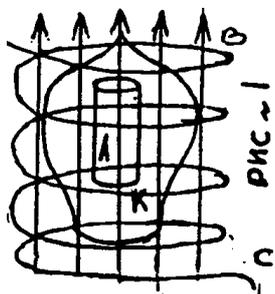
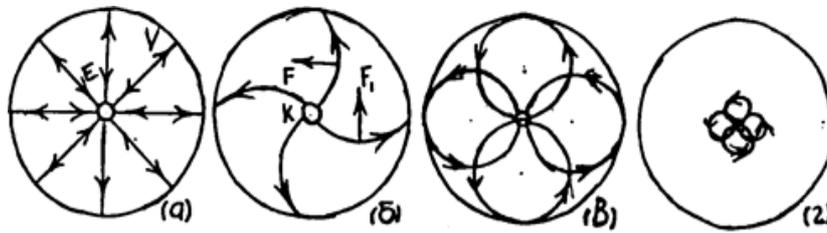


Рис.2



$$B=0$$

$$B_{KP} > B > 0$$

$$B = B_{KP}$$

$$B > B_{KP}$$

Как известно разность потенциалов численно равна работе по переносу единичного заряда из одной точки поля в другую. В данном случае разность потенциалов, равная анодному напряжению  $U_A$ , совершает перенос от катода к аноду электрона зарядом  $Q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. И выполняемая электрическим полем работа  $A = e \cdot U_A$  идет на сообщение электрону кинетической энергии, равной  $\frac{m \cdot v^2}{2}$ .

Следовательно 
$$e \cdot U_A = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Отсюда скорость  $v$  электрона достигшего анода будет равной

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (1)$$

Следует заметить, что электрическое поле между анодом и катодом резко неоднородно. Густота силовых линий, а следовательно, и напряженность поля  $E$ , вблизи катода много больше чем в средней и прианодной области (рис.2а). Поскольку напряженность есть градиент потенциала, то есть равна изменению потенциала на единице расстояния вдоль силовой линии, анодное напряжение  $U_A$  распределено в пространстве между анодом и катодом неравномерно. Основная часть его падает на прикатодном участке силовых линий. Идеализируя, можно считать, что все анодное напряжение падает на очень малом участке вблизи катода, на котором и происходит разгон электронов, а дальше, т.е. практически на всем своем пути от анода к катоду, электроны движутся с практически постоянной по величине скоростью. Эта скорость и определяется по формуле (1).

Если по длинному соленоиду пропустить ток силой  $I_c$ , то внутри его создается однородное магнитное поле с индукцией

$$B = \mu_0 \mu \frac{N}{l} I \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды (в данном случае  $\mu = 1$ );  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $N$  – число витков соленоида ( $N=2000$ );  $l$  – длина соленоида.

Как известно, на электрон, движущийся в магнитном поле действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e \cdot [\vec{v} \cdot \vec{B}] \quad (3)$$

Так как в силу конструкции магнетрона векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  ортогональные, то величина силы Лоренца будет равна

$$F = e \cdot v \cdot B \quad (4),$$

а ее направление  $\vec{F}$  определяется из векторного произведения (3) или по правилу левой руки с учетом отрицательного знака заряда электрона (рис.2б). Из формулы Лоренца

(3) следует, что магнитное поле в отличие от электрического действует только на движущуюся частицу: при  $v=0, F=0$ . Кроме того это действие не приводит к изменению величины скорости частицы. Действительно элементарная работа силы Лоренца  $dA_{л}$  равна  $dA_{л} = F \cdot dr \cdot \cos\alpha$ , где  $\alpha$ - угол между перемещением частицы  $dr$  и силы  $F$ . Из векторного произведения (3) следует, что  $\vec{F} \perp \vec{v}$ , следовательно  $\vec{F} \perp d\vec{r}$  (т.к.  $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ ) и  $\cos\alpha=0$ . Значит, работа силы Лоренца  $dA_{л}$  равна нулю, т.е. в магнитном поле кинетическая энергия частицы  $\frac{m \cdot v^2}{2}$  остается неизменной и ее скорость по величине постоянной ( $v=const$ ) таким образом магнитное поле не ускоряет частицы (не изменяет величины их скорости), а только искривляет их траекторию. Сила Лоренца является силой центростремительной, и по второму закону Ньютона имеем

$$F = e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (5)$$

где  $r$ - радиус кривизны траектории частицы (электрона).

Из (5) для  $r$  получим

$$r = \frac{v}{\frac{e}{m} \cdot B} \quad (6)$$

Как видно из формулы (6) в однородном ортогональном магнитном поле ( $B=const$ ) траектория частицы- окружность ( $r=const$ ). При этом учтено, что  $v=const$ , т.к. магнитное поле электроны не ускоряет, а геометрия электрического поля в данном магнетроне позволяет считать их скорости практически неизменными на большей части пути от анода к катоду, о чем писалось выше.

С ростом индукции магнитного поля  $B$  радиусы траектории электронов уменьшаются и при некотором значении  $B=B_{кр}$  (критическое) они станут равными половинным расстояния между анодом и катодом (рис. 2 в)

$$r = \frac{(R_A - R_K)}{2} \quad (7)$$

В этом случае электроны перестанут достигать анода и будут по окружности возвращаться к катоду. При этом анодный ток  $I_A$  лампы, пропорциональный количеству электронов, достигающих анод в единицу времени, резко уменьшается теоретически до нуля (кривая (а) на рис.3). При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля ( $B > B_{кр}$ ) электроны будут круче заворачивать к катоду, а анодный ток останется равным нулю (рис.2). Наблюдение скачкообразного уменьшения анодного тока магнетрона в зависимости от величины магнитного поля лежит в основе используемого метода определения удельного заряда электрона. Расчетная формула для  $e/m$  легко получается из выражения для радиуса кривизны (6), если учесть его критическое значение (7) и выразить скорость электронов из формулы (1)

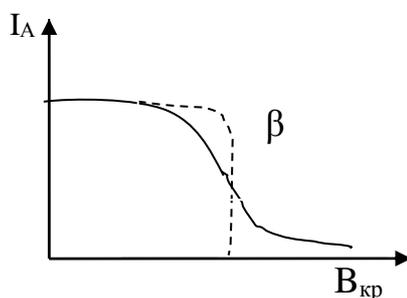


Рис. 3

$$\frac{(R_A - R_K)}{2} = \frac{v}{\frac{e}{m} \cdot B} = \frac{\sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A}}{\frac{e}{m} \cdot B_{кр}}$$

Откуда получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_A}{(B_{кр})^2 \cdot (R_A - R_K)^2}$$

Выражая  $B_{кр}$  из формулы (2) окончательно найдем, что

$$\frac{e}{m} = K \cdot \frac{U_A}{(I_{кр})^2}, \quad (8)$$

$$\text{где } K = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot l}{\mu_0 \mu N (R_A - R_K)} \right)^2$$

Через  $I_{кр}$  обозначено значение тока соленоида  $I_c$ , соответствующее индукции  $B=B_{кр}$ . Коэффициент  $K$  зависит только от конструктивных данных магнетрона.

Таким образом, для определения удельного заряда электрона методом магнетрона, достаточно снять зависимость анодного тока лампы  $I_A$  от тока в соленоиде  $I_c$ , так называемую сбросовую характеристику. Очевидно, форма графика этой зависимости должна быть аналогичной кривой  $I_A = f(B)$ , представленной на рис.3. Используя полученную кривую, на ней можно найти значение  $I_{кр}$ , а затем по формуле (8) вычислить  $e/m$ .

На рис.3 представлена идеализированная (а) и практическая (б) сбросовые характеристики. На последней, спадающий участок более размытый. Это объясняется как различного рода несовершенствами конструкции магнетрона. Сюда относятся не точная коаксиальность анода и катода, не строгая однородность магнитного поля внутри соленоида и др. Особо нужно отметить тепловой разброс начальных скоростей электронов, вылетающих с поверхности катода, приводящий к размытию кривой. В связи с этим затрудняется отсчет сбросового, т.е. критического значения намагничивающего тока  $I_{кр}$ . По-видимому, наиболее удовлетворяющему теории, следует считать то значение  $I_c$ , при котором наблюдается наибольшее изменение  $I_A$ .

#### Схема экспериментальной установки.

Рабочая схема показана на рис.4. Основу ее составляет электронная лампа Л, помещенная в соленоид С.

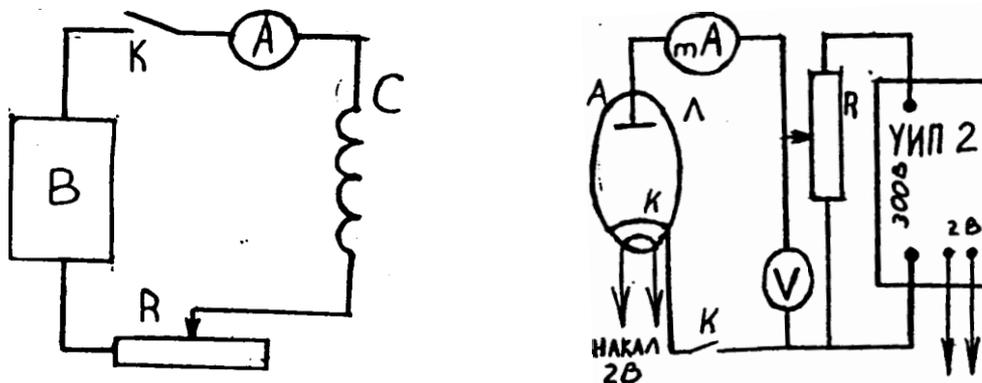


Рис.4.

Постоянное анодное напряжение  $U_A$  снимается с источника питания, регулируется потенциометром  $R$ , рукоятка которого располагается на панели стенда и измеряется вольтметром  $V$ . Анодный ток измеряется миллиамперметром  $mA$ . На панели стенда имеются также клеммы, с которых снимается напряжение  $2B$ , предназначенная для питания накала нити катода.

Намагничивающийся соленоид  $C$  питается от выпрямителя  $B$ . Ток соленоида регулируется ручками на панели выпрямителя и более плавно реостатом  $R$ .

Измеряется  $I_c$  амперметром  $A$ .

### Порядок выполнения работы.

1.Собрать схему (рис.4). При этом регуляторы выходного анодного напряжения и выпрямителя установить на нулевое значение. Схему не включать до проверки ее преподавателем или лаборантом.

2. После включения схемы подождать 2-3 минуты, пока прогреется катод магнетрона.

3. По заданию преподавателя установить величину анодного напряжения  $U_A$  и записать ее в отчет по работе.

4. Поддерживая все время  $U_A$  строго постоянным (особенно в критический момент) последовательно увеличивая намагничивающий ток соленоида  $I_c$  снять сбросовую характеристику  $I_A = I_A(I_c)$ . Результаты измерения записать в таблицу.

$I_c(A)$				
$I_A(mA)$				

Интервалы изменения  $I_c$  и число измерений подобрать самостоятельно, более тщательно измеряя критический участок.

5. Построить график сбросовой характеристики магнетрона.

6. Определить по нему критическое значение  $I_{кр}$  и записать его в отчет.

7. Записать в отчет конструктивные данные магнетрона:

число витков соленоида  $N=2000$ , радиус катода  $R_K = 0,1cm$  и анода  $R_A=0,95cm$ .

Измерить и записать длину соленоида  $l$ .

8. Рассчитать по формуле (8) величину коэффициента  $K$  и определить значение  $\frac{e}{m}$  для электрона.

9. Сравнить полученное значение  $\frac{e}{m}$  с табличным и выразить разницу в процентах.

### Контрольные вопросы.

1. Что называется удельным зарядом частиц?

2. Как действует электрическое поле на заряженную частицу?

3. Как действует магнитное поле на находящуюся в нем частицу?

4. Каково устройство используемого в работе магнетрона?

5. Как движутся электроны в магнетроне?

6. Расскажите о критическом режиме работы магнетрона?

7. Какие идеализации вводятся при рассмотрении движения электронов в магнетроне?
8. Вывести рабочую формулу (8).

### Лабораторная работа № 13. Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решётки.

**Цель работы:** 1. Познакомится с явлением дифракции света в параллельных лучах дифракционной решетки.

2. Определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки.

**Приборы и принадлежности:** установка с источником света, щелью и дифракционной решеткой.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается подвергать установку ударным и силовым нагрузкам.

4. По окончании работы, подсветку отключить от сети.

#### Краткие теоретические сведения

1. Дифракция света.

Дифракцией света называется огибание световыми волнами встречных препятствий.

В более широком смысле дифракцией света называется совокупность явлений, обусловленных волновыми свойствами света и наблюдаемых при его распространении в среде с резко выраженными неоднородностями (отверстия в непрозрачных экранах, границы непрозрачных тел и т.д.).

Явление дифракции указывает на нарушение законов геометрической оптики.

Явление дифракции наблюдается на расстоянии  $l$  от препятствия  $l = \frac{D^2}{4\lambda}$ , где  $D$  -

линейные размеры препятствия,  $\lambda$  - длина волны (условие наблюдения дифракции).

Для решения дифракционных задач - отыскание распределения на экране интенсивности световой волны, распространяющейся в среде с препятствиями, - применяются приближенные методы, основанные на принципах Гюйгенса и Гюйгенса - Френеля.

Принцип Гюйгенса: каждая точка  $S_1, S_2, \dots, S_n$  фронта волны  $AB$  является источником новых, вторичных волн. Новое положение фронта волны  $A_1B_1$  через время  $\Delta t$  представляет собой огибающую поверхность вторичных волн (рис.1).

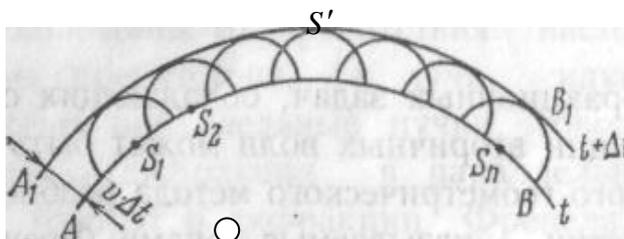


рис.1

Принцип Гюйгенса является чисто геометрическим. Он позволяет, например, объяснить равенство углов падения  $i$  и отражения  $i'$  на поверхности  $MN$  среды при отражении света (рис.2). Разность хода  $CB$  лучей  $AA_2$  и  $BB_2$  создает такой фронт  $DB$  отраженной волны, что из прямоугольных треугольников  $ADB$  и  $ACB$  ( $AD=CB$ ) следует равенство:  $i=i'$  (рис.2). Также можно объяснить закон преломления.

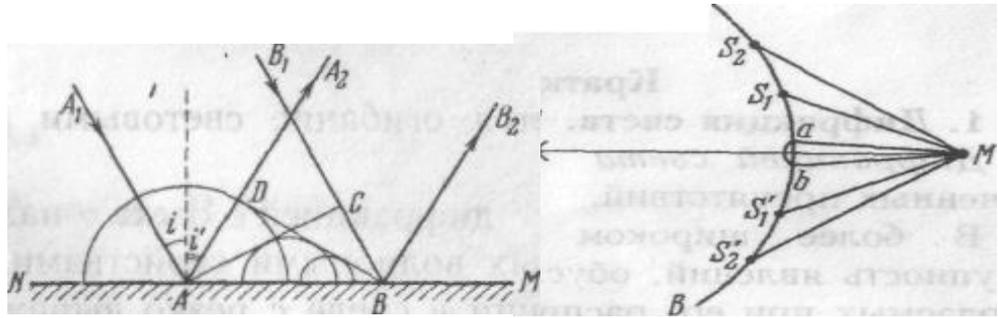


рис.2

рис.3

Принцип Гюйгенса - Френеля: все вторичные источники  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , расположенные на поверхности фронта волн, когерентны между собой. Амплитуда и фаза волны в любой точке  $M$  пространства - это результат интерференции волн, излучаемых вторичными источниками (рис. 3).

Прямолинейное распространение луча  $SM$ , испущенного источником  $S$  в однородной среде, объясняется принципом Гюйгенса - Френеля. Все вторичные волны, излучаемые вторичными источниками, находящимися на поверхности фронта волны  $AB$ , гасятся в результате интерференции, кроме волн от источников, расположенных на малом участке сферического сегмента  $ab$ , перпендикулярного к  $SM$  (рис.3). Свет распространяется вдоль узкого конуса с очень малым основанием, т.е. практически прямолинейно.

В ряде дифракционных задач, обладающих осевой симметрией, расчет интерференции вторичных волн может быть сильно упрощен с помощью наглядного геометрического метода разбиения фронта волны на кольцевые участки, называемые зонами Френеля. Разбиение на зоны производится так, чтобы оптическая разность хода от сходственных границ (внутренних или внешних) каждой пары соседних зон до рассматриваемой точки  $M$  равнялась  $\frac{\lambda}{2}$ .

Вторичные волны от сходственных точек двух соседних зон приходят в точку  $M$  в противоположных фазах и взаимно ослабляют друг друга при наложении.

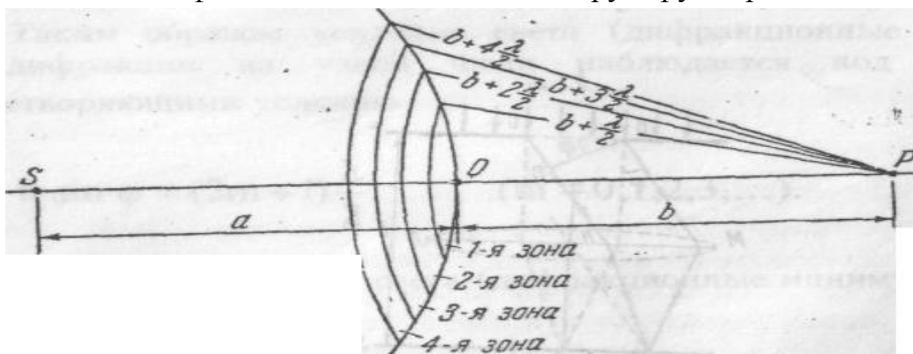


рис. 4

На рис. 4 показано построение зон Френеля в случае сферической волны возбуждаемой источником  $S$ .

Так как  $a, b \gg \lambda$ , то при не слишком большом  $k$  площади первых  $k$  зон Френеля одинаковы:

$$S_1 = S_2 = \dots = S_k = \frac{\pi \cdot ab\lambda}{a + b}$$

В случае плоского волнового фронта

$$S_1 = S_2 = \dots = S_k = \pi b \lambda$$

Различают два случая дифракции. Если источник света и точка наблюдения  $P$  расположены от препятствия настолько далеко, что лучи, падающие на препятствие, и лучи, идущие в точку  $P$  образуют практически параллельные пучки, говорят о дифракции Фраунгофера или о дифракции в параллельных лучах. В противном случае говорят о дифракции Френеля, т.е. дифракцией Френеля называют такие дифракционные задачи, в которых нельзя пренебрегать кривизной волновых поверхностей падающей и дифрагировавшей волн.

## 2. Дифракция света на щели. Дифракционная решетка.

Пусть на непрозрачный экран  $\mathcal{E}$ , в котором прорезана узкая щель  $BC$ , имеющая постоянную ширину  $b=BC$  и длину  $L \gg b$ , падает перпендикулярно к экрану пучок параллельных лучей монохроматического света (рис 5).

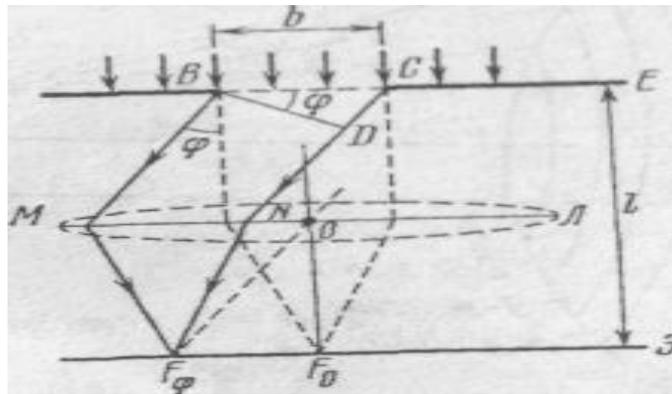


рис. 5

На экране  $\mathcal{E}$ , удаленном от щели на расстоянии  $l$ , будет наблюдаться явление дифракции. Если бы этого явления не было, то на экране  $\mathcal{E}$ , установленном в фокальной плоскости собирающей линзы  $ML$ , в точке  $F_0$  главного фокуса линзы получилось бы изображение источника света. При дифракции на узкой щели на экране наблюдается интерференционная картина: последовательность размытых изображений источника света, разделенных темными промежутками. В точке  $F_\varphi$  на экране собираются все параллельные лучи, падающие на линзу под углом  $\varphi$  (угол дифракции) к оптической оси  $OF_0$  линзы, перпендикулярной к фронту волны.

Так как вторичные фиктивные источники фронта волн  $BC$  точечные, то фронты волн, излучаемых ими сферические, а следовательно, дифрагированные лучи идут во всех направлениях. Выберем те, которые идут под углом  $\varphi$  к направлению падающих лучей. Падая на линзу, эти лучи собираются в одной точке  $F_\varphi$  фокальной плоскости.

Мысленно разобьем щель на участки, крайние точки которых посылают лучи с разностью хода  $\frac{\lambda}{2}$ . В этом случае все лучи, посланные первым участком будут погашены лучами второго участка, лучи третьего - лучами четвертого и т.д. Следовательно, если число участков разбиения четное, т.е. если  $\delta = 2m \frac{\lambda}{2}$ , то в точке  $F_\varphi$  будет темно (минимум освещенности). Если же число участков разбиения нечетное, то точка  $F_\varphi$  будет освещена (максимум освещенности).

Таким образом, усиление света (дифракционные максимумы) при дифракции на узкой щели наблюдается под углами  $\varphi$ , удовлетворяющими условию

$$b \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, (m = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

Условие ослабления света (дифракционные минимумы).

$$b \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2}, (m = 0, 2, \dots).$$

Число  $m$  называется порядком дифракционного максимума или минимума. Величина  $\delta = CD = b \sin \varphi$  представляет собой оптическую разность хода между крайними лучами  $CN$  и  $BM$ , идущими от щели под углом  $\varphi$  (рис.5). В направлении  $\varphi = 0$  наблюдается самый интенсивный центральный максимум нулевого порядка. В точке  $F_0$  всегда наблюдается усиление света, независимо от значения длины волны  $\lambda$ .

При наблюдении дифракции на щели в белом свете интерференционная картина на экране оказывается окрашенной. В дифракционном максимуме каждого порядка ( $m = const$ ) ближе к центральному, неокрашенному максимуму называются дифракционные максимумы с меньшими длинами волн.

Дифракционной решеткой в оптике называется совокупность большого числа препятствий и отверстий, сосредоточенных в ограниченном пространстве, на которых происходит дифракция света.

Простейшей дифракционной решеткой является система из  $N$  одинаковых параллельных щелей в плоском непрозрачном экране ширины  $b$  каждая, расположенных на равных непрозрачных промежутках  $a$  друг от друга (рис. 6).

Величина  $d = b + a$  называется постоянной дифракционной решетки.

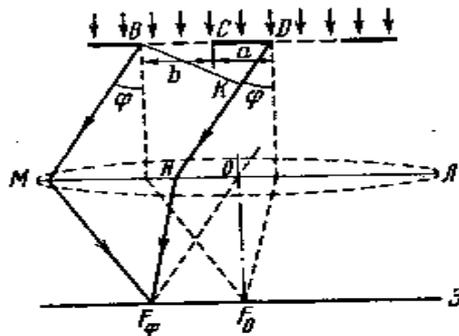


рис.6

По принципу Гюйгенса-Френеля каждая щель является источником когерентных волн, способных интерферировать друг с другом. Если на дифракционную решетку перпендикулярно к ней падает пучок параллельных лучей света, то под углом дифракции  $\varphi$  на экране  $\mathcal{E}$ , расположенном в фокальной плоскости линзы, будет наблюдаться система дифракционных максимумов минимумов, полученная в результате интерференции света от различных щелей.

Пусть при падении плоской монохроматической волны на дифракционную решетку лучи, дифрагированные на одной щели дают в точке  $F_\varphi$  максимум освещенности. Это еще не значит, что в точке  $F_\varphi$  будет максимум освещенности, так как лучи посланные этой щелью могут быть погашены лучом от соседней, или наоборот усилены. Если усилены, то в точке  $F_\varphi$  будет большая освещенность, чем от одной щели. Тогда, учитывая условие усиления волн при

интерференции, главные максимумы при дифракции на решетке наблюдаются под углами  $\varphi$  удовлетворяющими условию

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

где  $k=0,1,2,3$  называется порядком главного максимума. Величина  $\delta = DK = d \sin \varphi$  является оптической разностью хода между сходственными лучами  $BM$  и  $DN$ , идущими от соседних щелей (рис.6).

Главные минимумы на дифракционной решетке наблюдаются под такими углами  $\varphi$  дифракции, для которых свет от разных частей каждой щели полностью гасится в на одной щели

$$b \sin \varphi = m\lambda, \quad (m=0, 1, 2, 3, \dots).$$

Так как если ни одна из щелей не посылает лучей в этом направлении то в соответствующей точке на экране будет темнота.

При наблюдении дифракции в некогерентном свете все главные максимумы, кроме центрального нулевого максимума, окрашены. С увеличением длины волны главные максимумы внутри данного порядка располагаются под большими углами от центрального. Радужная полоска, содержащая семь цветов от фиолетового до красного (считается от центрального максимума), называется дифракционным спектром. Дифракционная решетка является одним из простейших достаточно точных устройств для измерения длин волн.

#### Теория метода и описание установки.

Рассмотрим один из методов определения длины светлой волны при помощи дифракционной решетки. На оптической скамье (или специальной рейке) укрепляется дифракционная решетка  $P$  и перпендикулярно оси подвижная миллиметровая линейка  $AB$  с щелью  $Щ$ . Деления линейки, щель и штрихи решетки располагают параллельно друг друга. Щель освещается источником  $S$  и рассматривается через решетку глазом (рис. 7). На линейке проецируются изображения главных максимумов и измеряется расстояние  $l_k$  между максимумом 1-го порядка и максимумом нулевого порядка (т.е. от щели)

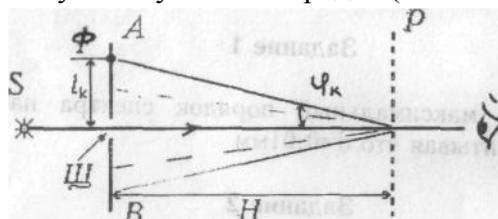


рис. 7

Ход лучей после дифракционной решетки соответствует ходу лучей на рис. 6. От источника света  $S$  через широкую щель в линейке  $AB$  проходит пучок белого света и попадает сначала на дифракционную решетку, а затем в глаз наблюдателя. Лучи, идущие параллельно главной оптической оси хрусталика дают в фокусе центральный (нулевой) максимум  $F_0$  освещенности белым светом.

Лучи, создающие в некоторой точке сетчатки  $F\varphi$  максимум освещенности каким-либо цветом (например, фиолетовым) падают на хрусталик под углом  $\varphi$ . Следовательно, они видны как бы выходящими из точки  $\Phi$ , положение которой определяется по шкале линейки  $AB$ .

Таким образом роль линзы  $L$  (см. рис. 6) выполняет хрусталик глаза, который фокусирует параллельные лучи, полученные в результате дифракции (например, лучи  $M$  и  $N$ ) на сетчатой оболочке глаза (играющей роль экрана).

Условие максимума освещенности имеет вид.

$$d \sin \varphi = k \lambda \quad (1)$$

Из рисунка видно, что

$$\sin \varphi = \frac{\ell}{\sqrt{H^2 + \ell^2}} \quad (2)$$

Следовательно

$$\lambda = \frac{d \ell}{k \sqrt{H^2 + \ell^2}} \quad (3)$$

Так, как  $H \gg \ell$ , то

$$\lambda = \frac{d \ell}{k H} \quad (4)$$

#### Задание 1.

Определить максимальные порядок спектра наблюдаемого в данной работе, учитывая что  $d=0.01$  мм.

#### Задание 2.

1. Установить линейку  $AB$  на заданном расстоянии  $H$  от дифракционной решетки ( $H > 300$  мм). Включить источник света  $S$  и, глядя через дифракционную решетку не щель, провести наблюдение дифракционного спектра.

2. Определение положение  $l_k$  для синей, зеленой и красной линии слева и справа для 1-го и 2-го порядков спектров.

Результаты занести в таблицу.

3. По формуле (4) вычислить длины волн указанных линий.

4. Указать и оценить основные погрешности данного метода измерения, а также погрешность, допускаемую при использовании формулы (4), а не (3)

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ.

$d=0,01$  мм

$H=$

(мм)

Порядок спектра $k$	$k$ (мм)					
	Фиолетовый		Зеленый		Красный	
	левый	правый	левый	правый	левый	правый
I						
II						

#### Контрольные вопросы.

1. Что называется дифракцией света? Каковы условия наблюдения этого явления.
2. Сформулировать принцип Гюйгенса.
3. Сформулировать принцип Гюйгенса-Френеля.
4. Объяснить с использованием принципа Гюйгенса - Френеля закон прямолинейного распространения света.
5. Что такое «зоны Френеля». Как определяются площади первых  $k$  зон?
6. Что такое дифракционная решетка? Определить условия дифракции на решетке.
7. Вывести формулу (4).

## Лабораторная работа № 14. Проверка закона Малюса.

**Цель работы:** проверить закон Малюса.

**Оборудование:** 1. Установка для проверки закона Малюса.

2. Источник света.

3. Микроамперметр.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается подвергать установку ударным и силовым нагрузкам.

4. По окончании работы, подсветку отключить от сети.

### Краткая теория

Как известно, плоская электромагнитная световая волна является поперечной и представляет распространение взаимно перпендикулярных колебаний: вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  (рис.1а). Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются в основном колебаниями электрического вектора. Вектор  $\vec{E}$  называется световым вектором, и все рассуждения мы ограничим рассмотрением этого вектора. Наличие вектора  $\vec{H}$  подразумевается.

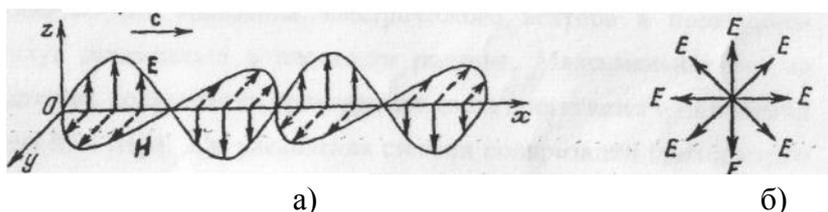


рис1.

Световой пучок, в котором различные направления вектора  $\vec{E}$  в поперечной к направлению распространения волны плоскости равновероятны, называется естественным (рис. 1б)

Свет, в котором направления колебаний вектора упорядочены каким-либо образом и подчиняются некоторой закономерности, называется поляризованным. Если колебания вектора могут совершаться лишь в одном определенном направлении, то свет называется линейно или плоскополяризованным (рис. 2а).

Если же колебания вектора  $\vec{E}$  совершаются так, что его конец описывает круг или эллипс, то свет называется соответственно поляризованным по кругу (рис. 2б) или эллиптически поляризованным (рис.2в). При линейной поляризации плоскость, содержащая луч и вектор  $\vec{E}$ , называется плоскостью колебаний, или плоскостью поляризации волны.

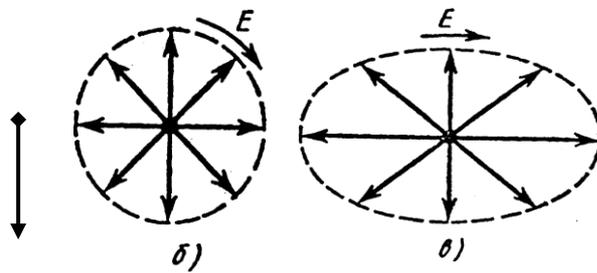


рис 2.

Для получения линейно поляризованного света применяются специальные оптические приспособления- поляризаторы. Плоскость колебаний электрического вектора в волне, прошедшей через поляризатор, называется плоскостью поляризатора. Для получения плоскополяризованного света используют несколько способов.

а) Отражение света от поверхности диэлектриков.

Отраженный от диэлектрика свет всегда частично поляризован. На рисунке черные точки соответствуют колебаниям вектора  $\vec{E}$  перпендикулярным плоскости падения, а стрелочки - колебаниям в плоскости падения (Рис.3). Степень поляризации отраженного луча зависит от относительного показателя преломления  $n_{21}$  и от угла падения  $\alpha$ . При падении луча  $E$  на плоскость  $MN$  под углом Брюстера  $\alpha_B$  отраженный луч  $E_{\perp}$  полностью поляризован. Преломленный луч  $E_{\parallel}$  поляризован частично. Соотношение  $tg\alpha_B = n_{21}$  называется законом Брюстера. Плоскость колебаний электрического вектора в отраженном свете перпендикулярна плоскости падения.

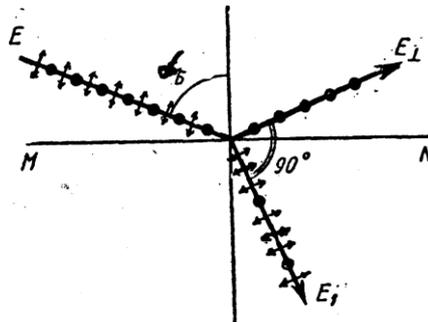


рис.3

б) Преломление света в стопе стеклянных пластин (стопа Столетова).

Поскольку отраженный от диэлектрической пластинки свет частично (или даже полностью) поляризован, проходящий свет также частично поляризуется и становится смешанным светом. Преимущественные колебания электрического вектора в прошедшем свете будут совершаться в плоскости падения. Максимальная, но не полная степень поляризации проходящего света достигается при падении под углом Брюстера. Для увеличения степени поляризации проходящего света используют стопу стеклянных пластинок (стопу Столетова), расположенных под углом Брюстера к падающему свету. В этом случае можно получить практически полностью поляризованный проходящий свет, так как каждое отражение ослабляет пропущенные колебания, перпендикулярные плоскости падения в определенном отношении.

в) Преломление света в двоякопреломляющих кристаллах.

Некоторые кристаллы (исландский шпат, кварц, слюда и др.), а также некоторые изотропные вещества (под действием механических нагрузок или электрических полей) обладают свойством двойного лучепреломления. Преломляясь в таком кристалле, световой луч разделяется на два линейно поляризованных луча со взаимно перпендикулярными направлениями колебаний. Один из лучей называется обыкновенным и обозначается буквой  $o$ , а второй -необыкновенный и обозначается буквой  $e$ . Обыкновенный луч удовлетворяет обычному закону преломления и лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью. Для необыкновенного луча отношение синусов угла падения и угла преломления не остается постоянным при изменении угла падения.

Кроме того, необыкновенный луч, как правило, не лежит в плоскости падения и отклоняется от луча  $O$  даже при нормальном падении света. Отклоняя один из лучей в сторону, можно получить плоскополяризованный луч. Так устроена, например призма Николя (рис.4). Две естественные грани кристалла исландского шпата срезаются так, чтобы уменьшить угол между поверхностями до  $68^\circ$ .

Затем кристалл распиливается на две части по плоскости  $BD$  под углом  $90^\circ$  к новым граням. После полировки поверхности распила склеиваются канадским бальзамом, имеющим показатель преломления  $n$ , удовлетворяющий условию  $n_e < n < n_o$ , где  $n_o$  и  $n_e$  - показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного луча.

Падая под углом, больше предельного, на плоскость  $BD$ , обыкновенный луч претерпевает полное внутреннее отражение на границе шпат - бальзам. Необыкновенный луч, для которого, выходит из призмы линейно поляризованным.

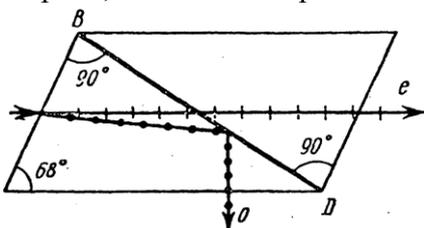


рис.4

#### г) Поглощение света в дихроических пластинках.

У некоторых двоякопреломляющих кристаллов (например, турмалина) коэффициенты поглощения света для двух взаимно перпендикулярных поляризованных лучей отличаются настолько сильно, что уже при небольшой толщине кристалла один из лучей гасится практически полностью и из кристалла выходит линейно поляризованный пучок света. Это явление называется дихроизмом. В настоящее время дихроические пластинки изготавливают в виде тонких пленок - поляроидов, имеющих широкое применение. В большинстве случаев они состоят из множества маленьких (толщиной до  $0,3$  мм) параллельно ориентированных кристаллов сернокислого йодистого хинина-герапатита, находящихся внутри связующей среды - прозрачной пленки.

Для исследования характера и степени поляризации света применяют устройства, называемые анализаторами. В качестве анализаторов используют тоже устройства, которые служат для получения линейно-поляризованного света (поляризаторы).

Пусть на поляризатор падает плоскополяризованный свет амплитуды  $A_0$  и интенсивностью  $I_0$  (Рис. 5). Сквозь поляризатор пройдет составляющая колебания с амплитудой  $A = A_0 \cos \alpha$ , где  $\alpha$  - угол между плоскостью колебаний падающего света и

плоскостью поляризатора. А так как интенсивность света пропорциональна квадрату его амплитуды, то интенсивность прошедшего света определяется выражением  $I = I_0 \cos^2 \alpha$ .

Это соотношение носит название закона Малюса.

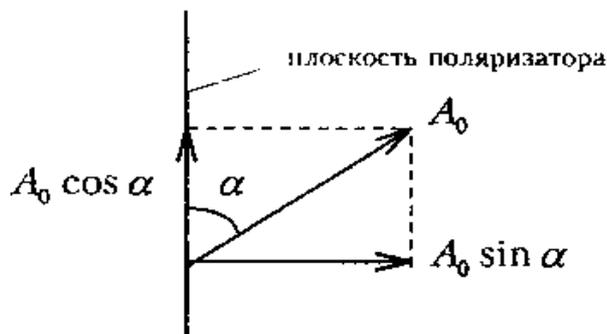


Рис. 5

Поставим на пути естественного луча поляризатор  $P$  и анализатор  $A$  (рис.6). Из поляризатора выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого составит половину интенсивности естественного света, т.е.  $I_1 = \frac{1}{2} I_0$ . Согласно закону Малюса из анализатора выйдет свет интенсивностью:  $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$  (где  $\alpha$  - угол между плоскостями поляризатора и анализатора). Таким образом, интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор равна  $I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$ .

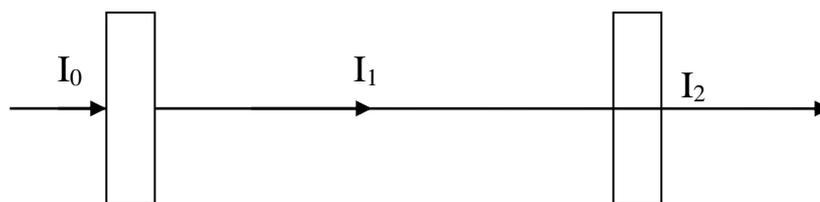


рис.6

### Описание установки.

В настоящей работе для получения и исследования линейного поляризованного света применяют поляроиды. Они изготавливаются из очень мелких кристаллов турмалина или герпатита, нанесенных на целлулоидную пленку. Оптические оси кристаллов специальным образом ориентируют в одном направлении. Кристаллы турмалина пропускают свет только с определенной ориентацией светового вектора и почти полностью поглощают все

перпендикулярные составляющие светового вектора к направлению оси кристалла.

Схема установки приведена на рис 7.

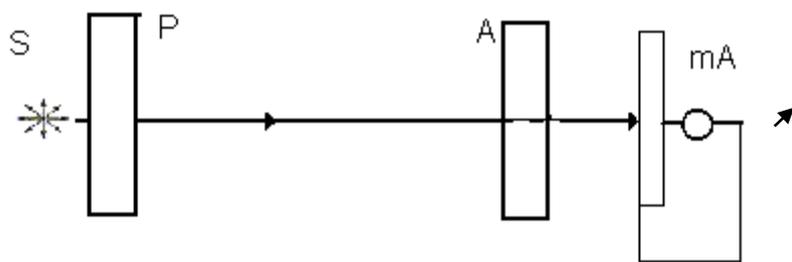


рис. 7

Свет от источника света  $S$  проходит через неподвижный поляризатор  $P$ . Анализатор  $A$  закреплен во вращающемся диске. Угол поворота анализатора измеряется по шкале диска, разделенной на  $360$  делений. Пройдя поляризатор и анализатор, свет падает на вентильный фотоэлемент  $V\Phi$  (солнечный элемент). При не очень больших освещенностях сила фототока пропорциональна световому потоку. Величина фототока измеряется микроамперметром. Между поляризатором и анализатором имеется камера, в которую можно помещать образцы для наблюдения явления фотоупругости и интерференции поляризованных лучей.

#### Ход работы.

1. Включить источник света.

2. Вращая анализатор, добиться максимального отброса стрелки микроамперметра ( $A$  может быть следует добиваться минимального? Почему? Чему равен угол в этом случае?).

3. Записывают показания микроамперметра и в дальнейшем, поворачивая анализатор, через  $10$  градусов записывают соответствующие значение тока.

4. Каким образом по полученным данным можно убедиться в правильности закона Малюса? Какие графики из ниже перечисленных следует построить для проверки закона?

(выбор аргументировать);  $\frac{I}{I_0} = f(\cos\varphi)$ ;  $\frac{I}{I_0} = f(\cos^2\varphi)$ ;  $I = f(\varphi)$ ;  $I_2 = f(\varphi)$

5. Построить график зависимости.

6. Сделать вывод.

#### Результаты измерений.

$\alpha$	$I$	$\cos\alpha$	$\cos 2\alpha$

#### Контрольные вопросы.

1. Что представляет из себя световая волна?
2. Какие действия оказывает свет? Благодаря чему это возможно?
3. Что такое поляризация? Какой свет называют естественным? Поляризованным?
4. Опишите виды поляризации.
5. Перечислите способы получения поляризованного света.
6. Сформулируйте закон Малюса.
7. Какие данные в работе позволяют убедиться в справедливости закон Малюса ? (ответ сформулируйте).

## Лабораторная работа № 15. Изучение внешнего фотоэффекта.

**Цель работы:** изучение законов внешнего фотоэффекта и определение постоянной Планка.

**Оборудование:** Установка для изучения законов внешнего фотоэффекта.

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до  $1000\text{В}$  и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание и закрыть отверстие фотоприёмника заглушкой.

### Краткие теоретические сведения

Различают три вида фотоэффекта:

- *Внешним фотоэффектом* называется вырывание электронов из вещества под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается преимущественно в проводниках.
- При *внутреннем фотоэффекте* электроны под действием света теряют связь со своими атомами и молекулами, но остаются внутри вещества. Такой вид фотоэффекта возможен только в полупроводниках.
- *Вентильный фотоэффект* заключается в возникновении фото - э.д.с. при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла без наличия внешнего электрического поля.

В данной работе для изучения закономерностей *внешнего фотоэффекта* используют вакуумный фотоэлемент. Он представляет собой стеклянный откачанный сферический баллон, в центре которого расположен анод  $A$  в виде кольца или пластинки (рис.1). Часть внутренней поверхности баллона покрыта тонким слоем металла, который служит *фотокатодом*. На рис.1. изображена принципиальная схема, с помощью которой исследуется внешний фотоэффект. Между **анодом** и **катодом**

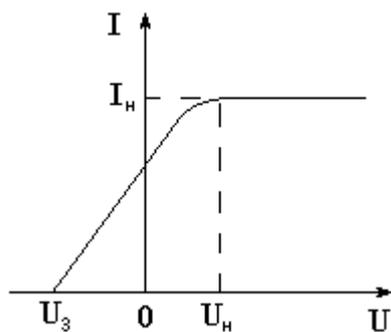


Рис. 2

источник тока создает электрическое поле. Так как электрическая цепь разомкнута, то при отсутствии света электрический ток через фотоэлемент не идет. При освещении катода свет вырывает из него электроны, которые под действием сил электрического поля движутся к аноду. В цепи появляется электрический ток, называемый *фототоком*. Сила фототока измеряется гальванометром  $G$ , напряжение между анодом  $A$  и фотокатодом  $K$  — вольтметром  $V$ . Изменяя напряжение с помощью потенциометра  $P$ ,

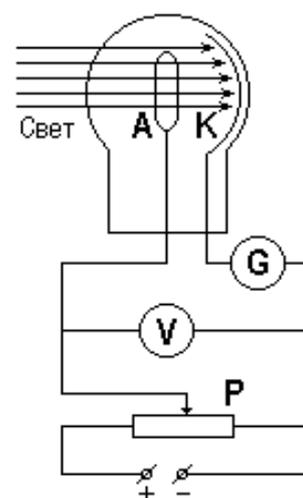


Рис. 1

Изменяя напряжение с помощью потенциометра  $P$ ,

находят зависимость силы фототока от напряжения — вольтамперную характеристику.

На рис. 2 изображена вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента. При  $U = 0$  (между катодом и анодом электрического поля нет) сила фототока все равно не равна нулю. Это обусловлено тем, что электроны, вырванные светом из катода, имеют некоторую начальную скорость  $v$  (а значит, и кинетическую энергию) и часть из них может достигать анода и при отсутствии электрического поля.

Если увеличивать напряжение между катодом и анодом (подавая отрицательный потенциал на катод, а на анод — положительный), будет увеличиваться сила тока. Это объясняется тем, что теперь электроны, которые при  $U = 0$  не достигали анода, под действием сил электрического поля притягиваются к аноду.

Из графика видно, что при некотором значении  $U = U_n$  сила фототока достигает наибольшего значения, получившего название тока насыщения  $I_n$ . Дальнейшее увеличение напряжения уже не вызывает роста силы тока. Это значит, что все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Если за единицу времени свет вырывает из фотокатода  $n$  электронов, то ток насыщения будет равен

$$I_n = e \cdot n, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона.

Если поменять полярность электронов, то есть подать на **катод** положительный потенциал, а на **анод** — отрицательный, то электрическое поле будет тормозить движение электронов от катода к аноду. За счет работы сил электрического поля ( $A_E = eU$ ) кинетическая энергия движущихся электронов будет уменьшаться. Если первоначальная кинетическая энергия электрона  $W_K$  будет больше работы электрического поля ( $W_K > A_E$ ), электроны будут достигать анода, в цепи будет идти ток. При  $W_K \leq eU$  электроны анода не достигнут и ток прекратится.

Наименьшее напряжение, при котором прекращается фототок, называется **задерживающим**

При  $U = U_3$  даже самые быстрые электроны, имеющие максимальную скорость, не достигают анода. В этих условиях

$$e \cdot U_3 = \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} \quad (2)$$

Таким образом, измеряя на опыте  $U_3$ , можно вычислить максимальную кинетическую энергию электронов, вылетающих из катода.

### **Законы фотоэффекта**

Опытным путем были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

**1-й закон.** При неизменном спектральном составе света, падающего на катод, сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна световому потоку  $\Phi$ .

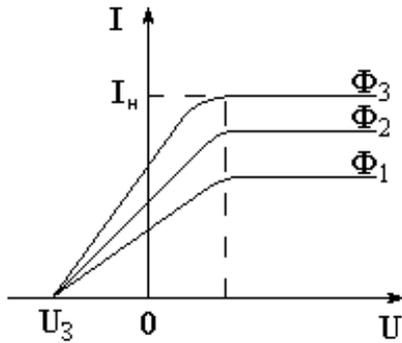


Рис. 3

На рис. 3 изображены вольтамперные характеристики при трех различных значениях световых потоков ( $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$ ).

**2-й закон.** Максимальная энергия фотоэлектронов линейно возрастает с ростом частоты света  $\nu$  и не зависит от светового потока.

На рис. 3 для трех различных световых потоков частоты излучения остались неизменными. Следовательно, одинаковы будут и максимальная кинетическая энергия и задерживающая разность потенциалов.

**3-й закон.** Фотоэффект не возникает, если частота света меньше некоторой характерной для каждого металла величины  $\nu_{min}$ , называемой **красной границей фотоэффекта**. Если частота падающего на катод света будет больше или равна  $\nu_{min}$  то фотоэффект будет ( $\nu \geq \nu_{min}$ ), если  $\nu < \nu_{min}$ , то фотоэффекта не будет.

**Минимальной частоте  $\nu_{min}$  соответствует максимальная длина волны**

$$\lambda_{max} = \frac{c}{\nu_{min}}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с).

### Объяснение законов фотоэффекта

Законы фотоэффекта были объяснены А.Эйнштейном на основе квантовой теории света. Согласно этой теории, излучение, поглощение и распространение света происходит порциями-квантами электромагнитных волн, названными фотонами. Энергия фотона равна

$$W_{\phi} = h \cdot \nu \quad (4)$$

где  $\nu$  – частота света,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

Энергия поглощенного фотона передается целиком только одному электрону. Часть этой энергии расходуется на совершение работы выхода электрона из вещества, оставшаяся часть сообщается электрону в виде кинетической энергии. Если электрон не тратит энергию на неупругие столкновения в металле, то его кинетическая энергия при выходе из металла будет максимальна. Исходя из закона сохранения энергии, можно записать соотношение, которое и было впоследствии названо *уравнением Эйнштейна*,

$$h \cdot \nu = A_{вых} + \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} \quad (5)$$

Работа выхода электрона  $A_{вых}$  зависит только от природы вещества и от состояния его поверхности. Для данного фотокатода работа выхода — величина постоянная.

Из уравнения Эйнштейна следует, что максимальная кинетическая энергия вылетающих из катода электронов прямо пропорциональна частоте света (*Второй закон фотоэффекта*).

Из этого же уравнения следует, что фотоэффект возможен, если энергия фотона  $h \cdot \nu$  больше или равна работе выхода электрона ( $h \cdot \nu \geq A_{\text{вых}}$ ). При условии  $h \cdot \nu < A_{\text{вых}}$  энергия фотона будет недостаточно для вырывания электрона из металла. Следовательно, минимальная энергия фотона  $h \cdot \nu_{\text{min}}$ , при которой еще возможен фотоэффект, равна работе выхода  $A_{\text{вых}}$  ( $h \cdot \nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}}$ ), а красная граница фотоэффекта

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (6)$$

Красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона, то есть от природы вещества катода (*Третий закон фотоэффекта*).

Световой поток определяется числом фотонов, падающих на поверхность катода в единицу времени. Следовательно,

Число вырванных в единицу времени электронов  $n$  (а значит и сила тока насыщения  $I_{\text{н}}$ ) прямо пропорционально световому потоку (*Первый закон фотоэффекта*).

### Устройство установки и принцип работы

Установка «Изучение внешнего фотоэффекта и определение постоянной Планка» включает в себя источник света, вакуумный фотоэлемент, усилитель постоянного тока и 5 светофильтров, которые могут поочередно устанавливаться перед фотоэлементом. Источник света и фотоэлемент установлены на направляющей скамье, расстояние между ними измеряется с помощью шкалы, расположенной на скамье. Ноль измерительной шкалы соответствует положению фотоприёмника. Длина волны пропускания светофильтра указана на его оправке.

### Порядок работы.

#### Построение вольтамперной характеристики фотоэлемента.

1. Включите питание установки, дайте ей прогреться в течение 5 минут, передвиньте источник света на отметку 25 см.
2. Установите максимальную интенсивность света, полярность напряжения переключите на «-». Режим цифрового дисплея переключите в положение «Ток». Переключатель «Коэффициент усиления» установите в положение « $\times 0,001$ ».
3. Установите красный светофильтр. Изменяя напряжение, добейтесь падения фототока до нуля и зафиксируйте значение запирающего напряжения  $U_s$ .
4. Повторите измерения по этому пункту для других светофильтров.
5. Получив значение запирающего напряжения для различных длин волн, определите частоту падающего света  $\nu : \nu = \frac{c}{\lambda}$ .

6. Постройте зависимость  $U_3(\nu)$ .

7. По полученным экспериментальным значениям  $U_3$  рассчитать:

а) кинетическую энергию фотоэлектронов:  $W_K = e \cdot U_3$

б) работу выхода электронов:  $A_{\text{вых}} = \frac{h \cdot \nu}{\lambda} - e \cdot U_3$

в) красную границу фотоэффекта:  $\lambda_{\text{вых}} = \frac{h \cdot c}{A_{\text{вых}}}$

8. Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта, записанного в виде:

$$U_3 = \left(\frac{h}{e}\right) \cdot \nu - \left(\frac{1}{e}\right) \cdot A$$

следует, что тангенс угла наклона построенного графика соответствует величине  $\frac{h}{e}$

Таблица 1

№ n/n	$\lambda$ , мкм	$U_3$ , В	$W_K, 10^{-19}$ Дж	$A_{\text{вых}} 10^{-19}$ Дж	$\lambda_{\text{max}}$ , мкм

9. По полученным данным построить график зависимости  $U_3$  от  $\nu$ , где  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ .

10. Используя полученный график, вычислить по формуле  $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu} = \frac{h}{e}$  и оценить погрешность измерений.

11. Умножив величину тангенса наклона на  $e$ , найдём значение постоянной Планка.

12. Переключите «Коэффициент усиления» в положение « $\times 1$ ».

13. Установите красный светофильтр (635нм) перед фотоприёмником, установите минимальную интенсивность света, полярность напряжения переключите на «+», «Коэффициент усиления» установите в положение « $\times 1$ » или « $\times 0,1$ ».

14. Постепенно увеличивая напряжение, наблюдайте изменение фототока. Для регистрации тока и напряжения используйте переключатель режимов цифрового дисплея.

15. Закрывая отверстие фотоприёмника рукой, наблюдайте падение фототока.

16. Заполните таблицу 2.

По данным таблицы 1 построить вольтамперную характеристику, то есть график зависимости силы фототока  $I$  (абсцисса) от напряжения на фотоэлементе  $U$  (ордината).

Таблица 2

СФ №1	$U, B$						
	$I, \text{мкА}$						
СФ №2	$U, B$						
	$I, \text{мкА}$						
СФ №3	$U, B$						
	$I, \text{мкА}$						
СФ №4	$U, B$						
	$I, \text{мкА}$						

### Контрольные вопросы

1. Что называется фотоэффектом? Какие бывают виды фотоэффекта?
2. В чем заключаются законы фотоэффекта?
3. Как связаны длина волны и частота фотона?
4. Какая именно особенность фотоэффекта не может быть объяснена с точки зрения волновой теории света?
5. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
6. Что называется красной границей фотоэффекта и от чего она зависит?
7. От чего зависит максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов?
8. Нарисуйте и объясните вольтамперную характеристику фотоэффекта.
9. На чем основан способ определения красной границы фотоэффекта в данной работе?

## Лабораторная работа № 16. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения.

**Цель работы:** установление температурной зависимости теплоемкости металлов методом охлаждения: изучение основ квантовой теории теплоемкости.

**Приборы и принадлежности:** набор цилиндрических образцов (медь, сталь, алюминий), источник питания, прибор для измерения ТЭДС (мультиметр с измерителем температуры).

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до  $1000\text{В}$  и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание.

### Краткие теоретические сведения.

Теплоемкостью тела  $C$  называют количество теплоты, поглощенной телом при нагревании на  $1\text{ К}$ . Теплоемкость, отнесенная к единице массы вещества называется удельной, отнесенная к молекулярной массе - молярной, к единице объема — объемной теплоемкостью. Единицами теплоемкости соответственно служат  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ;  $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$  и внесистемная единица  $\frac{\text{Кал}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

Количество теплоты, поглощенное телом при изменении его состояния зависит не только от начального и конечного состояний, но и от процесса при котором происходит нагрев тела, и его теплоемкость. Различают теплоемкость при постоянном объеме ( $C_V$ ) и теплоемкость при постоянном давлении ( $C_P$ ), если в процессе нагревания поддерживаются постоянными соответственно объем и давление.

При нагревании при постоянном давлении часть теплоты идет на совершение работы расширения тела, а часть на увеличение его внутренней энергии, тогда как при нагревании при постоянном объеме вся теплота расходуется на увеличение его внутренней энергии. Поэтому всегда  $C_P > C_V$ . Для газов (разреженных так, что их можно считать идеальными)  $C_P - C_V = R$ , где  $R$  - универсальная газовая постоянная, равная  $8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ,  $C_P$  и  $C_V$  - молярные теплоемкости. У жидкостей и твердых тел разница между  $C_P$  и  $C_V$  сравнительно мала. Для твердых тел комнатной температуры  $C_P > C_V$  на 3-5%, но эта разница возрастает с повышением температуры. Поэтому для твердых тел не имеет смысла различать  $C_P$  и  $C_V$  при этих температурах и можно пользоваться одним обозначением  $C$ .

Теоретическое вычисление теплоемкости, в частности и зависимости от температуры тела, не может быть осуществлено при помощи только термодинамических методов и требует применения методов статистической физики. Для газов вычисление теплоемкости сводится к вычислению средней энергии теплового движения отдельных молекул. Это движение складывается из поступательного и вращательного движения молекулы как целого и из колебаний атомов внутри молекулы. Согласно классической статистики, на каждую степень свободы поступательного и вращательного движения приходится в мольной

теплоемкости газа, величина равная  $\frac{R}{2}$ , а на каждую колебательную степень свободы -  $R$ ;

это правило называется законом равнораспределения. Молекула одноатомного газа обладает тремя поступательными степенями свободы и теплоемкость его составляет  $\frac{3R}{2}$ , что хорошо

согласуется с опытным. Для двухатомных молекул необходимо учитывать квантовые эффекты, т.е. пользоваться квантовой статистикой. Согласно квантовой механике, всякая система, совершающая колебания или вращения (в том числе молекула газа), может обладать лишь определенными дискретными значениями энергии. Если энергия теплового движения в системе недостаточна для возбуждения колебаний определенной частоты, то эти колебания не вносят своего вклада в теплоемкость системы.

В твердых. (кристаллических) телах тепловое движение атомов представляет собой малые колебания вблизи определенных положений равновесия (узлов кристаллической решетки).

Каждый атом обладает тремя колебательными степенями свободы, и, согласно закону распределения, мольная теплоемкость твердого тела должна быть равна  $3NR$ , где  $N$  - число атомов в молекуле (эту теплоемкость называют  $n$  - решеточной). Однако в действительности это значение лишь предел, к которому стремится теплоемкость твердого тела при высоких температурах. Он достигается уже при обычных температурах у многих элементов, в том числе металлов ( $N = 1$ ,  $C = 3R$ , так называемый закон Дюлонга и Пти) и у некоторых простых соединений [ $\text{NaCl}$ ,  $\text{MnS}$  ( $N = 2$ );  $\text{PbCl}_2$  ( $N = 3$ ) и др.]; у сложных соединений этот предел фактически не достигается, так как наступает плавление вещества или его разложение.

С классической точки зрения теплоемкость металлов должна значительно превышать теплоемкость диэлектрических веществ. В металлах имеются электроны проводимости, с классической точки зрения они обладают тремя степенями свободы. Если считать, что их число равно числу атомов, то электроны (как свободные частицы) должны внести вклад в теплоемкость  $C_3 = 1,5R$ , т.е. увеличить ее на 50%. В действительности этого не наблюдается и закон Дюлонга и Пти справедлив и для металлов. Кроме того, классическая теория теплоемкости не объясняет температурной зависимости теплоемкости, разницы в поведении диэлектриков и металлов при очень низких температурах, а также исключения из закона Дюлонга и Пти: алмаз, бериллий, бор, кремний и алюминий имеют при комнатной температуре теплоемкость гораздо меньшую  $3R$ .

А. Эйнштейн предложил простую модель для объяснения температурного хода теплоемкости кристаллов. Согласно этой модели каждый атом представляет собой осциллятор, колеблющийся с некоторой частотой, одинаковой для всех атомов кристалла. В отличие от классической модели здесь рассматривается квантовый осциллятор, энергия которого может принимать только дискретные значения, кратные  $h\nu_0$ , где  $\nu_0$  - частота колебаний осциллятора. Средняя энергия одномерного квантового осциллятора при температуре  $T$  определяется выражением:

$$\bar{\omega} = \frac{h\nu_0}{\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right) - 1}$$

В кристалле осциллятор следует считать трехмерным. Внутреннюю энергию 1 моль вещества в кристалле найдем умножив  $\varpi$  на  $3N$ :

$$E = \frac{3N \cdot h\nu_0}{\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right) - 1}$$

Теплоемкость твердого тела по Эйнштейну определяем, продифференцировав (1) по  $T$ :

$$C_V = \frac{dE}{dT} = 3R \left(\frac{h\nu_0}{kT}\right)^2 \frac{\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right)}{[\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right) - 1]^2}$$

Так как  $\nu_0$  определяется свойствами осцилляторов вещества, можно ввести характерный параметр  $\theta = \frac{h\nu_0}{k}$ , который называют температурой Эйнштейна. Вводя  $\theta$  в выражение для теплоемкости, получим:

$$C_V = 3R \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 \frac{\exp\left(\frac{\theta}{T}\right)}{[\exp\left(\frac{\theta}{T}\right) - 1]^2}$$

При  $\frac{\theta}{T} \ll 1$  теплоемкость стремится к  $3R$ . При низких температурах строится  $C_V$  стремится к нулю.

Сравнение теории Эйнштейна с экспериментальными данными показало, что предложенная им модель дает качественно верную температурную зависимость теплоемкости диэлектриков, не давая при этом хорошего количественного совпадения с экспериментом, особенно при низких температурах. Это и понятно, т.к. предположение Эйнштейна о равенстве собственных частот всех осцилляторов твердого тела является слишком упрощенным. Более совершенную теорию предложил в 1912 г. П.Дебай. Он предложил рассматривать совокупность атомов кристалла как упругую среду, ограниченную размером кристалла, в которой коллективные колебания атомов представляются суперпозицией собственных типов колебаний такой среды. Подобно тому как произвольное состояние электромагнитного поля при температуре стенок полости  $T$  можно представить суперпозицией отдельных типов поля, произвольные смещения атомов от положения равновесия при некоторой температуре  $T$  можно представить как результат наложения колебаний решетки как целого, возбужденных в кристалле при температуре  $T$ . Очевидно, что коллективные колебания выражены тем сильнее, чем ниже температура, а при достаточно больших  $T$  атомы можно считать колеблющимися независимо, так что для высоких температур выводы теории Дебая должны совпадать, с эйнштейновскими. Задача о нахождении внутренней энергии упругих колебаний решается в рамках модели Дебая подобно задаче о нахождении объемной плотности излучения абсолютно черного тела. Необходимо определить число типов колебаний в кристалле, приходящихся на единичный

спектральный диапазон упругих колебаний. Затем, умножив, это число на среднюю энергию осциллятора при температуре  $T$ , определить спектральную плотность энергии упругих колебаний. Проинтегрировав эту величину по всем частотам, которые могут существовать в кристалле данных размеров, можно определить внутреннюю энергию кристалла, продифференцировав последнюю по  $T$  получают температурную зависимость для  $C_V$ .

Внутренняя энергия кристалла при температуре  $T$ :

$$E = L^3 \cdot \int_0^{\nu_{\max}} \frac{12\pi V^2}{V^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$

где  $L$  - длина ребра кубического кристалла,  $\nu_{\max}$  - максимальная частота упругих колебаний в кристалле,  $V$  - скорость распространения упругих волн в кристалле.

Обозначив  $\frac{h\nu}{kT}$  через  $\alpha$ . будем иметь

$$E = C_V T = 12\pi \cdot h \frac{L^3}{V^3} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{\alpha \cdot d\alpha}{\exp \alpha - 1} dV$$

При низких температурах верхний предел можно считать бесконечно большим, тогда

$$E = 12\pi \cdot h \frac{L^3}{V^3} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int \frac{\alpha^3 \cdot d\alpha}{\exp \alpha - 1}$$

или

$$E = \frac{4}{5} \pi^3 \left(\frac{L}{V}\right)^3 \frac{k^4 T^4}{h^3} \quad (\text{так как табличный интеграл равен } \frac{\pi^4}{15}). \quad (5)$$

Полученное выражение можно упростить, введя параметр, называемый температурой Дебая:

$$\theta_D = \frac{h\nu_{\max}}{k}$$

Тогда

$$E = \frac{3\pi^4}{5} NkT^4 \theta_D^{-3} \quad (6)$$

Дифференцирую (6) по  $T$ , получим

$$C_V = \frac{12}{5} \pi^4 N \cdot k \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3$$

т.е. теплоемкость при низких температурах в одноатомном кристалле изменяется пропорционально  $T^3$ .

При высоких температурах множитель  $\frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$  стремится к  $kT$  и тогда из (4)

следует

$$E = \frac{L^3}{V^3} 4\pi k v_{\max}^3 T = 3NkT = 3RT$$

и теплоемкость при высоких температурах ( $T \gg \theta_D$ ) равняется

$$C_V = 3R$$

В таблице даны значения температуры Дебая для некоторых кристаллов

Вещество	Hg	Au	Zn	Al	Si	C
$\theta_D$	60	165	308	418	658	2000

Как уже указывалось выше, теплоемкость металлов при температурах выше Дебаевской очень мало отличается от теплоемкости диэлектриков. При температурах ниже дебаевской, теплоемкость металлов изменяется по закону:

$$C_V = \alpha T^3 + \gamma T$$

( $\alpha$  и  $\gamma$  - константы), который можно рассматривать как отражение того, что теплоемкость является суммой теплоемкости решетки и теплоемкости электронного газа. Анализ поведения электронного газа при низких температурах возможен только с применением аппарата квантовой механики. Этот анализ показывает, что даже при абсолютном нуле электроны в кристалле обладают значительной энергией (порядка нескольких эВ). Скорость электронов при этом составляет порядка миллиона метров в секунду. Уровень максимальной энергии электронов при абсолютном нуле называется уровнем Ферми  $E_F$ . При нагревании металла тепловому возбуждению могут подвергнуться лишь те электроны, энергия которых отличается от энергии Ферми приблизительно на  $kT$ .

Каждый из возбужденных электронов приобретает дополнительную энергию порядка  $kT$ . Следовательно, полная энергия электронов при нагревании металла до температуры  $T$  равна:

$$E = R \frac{T}{T_F},$$

$$\text{где } T_F = \frac{1}{k} E_F.$$

Отсюда для электронной части молярной теплоемкости имеем:

$$C_{V_e} = \frac{2R}{T_F} T$$

т.е. теплоемкость пропорциональна первой степени температуры. При комнатной температуре теплоемкость электронного газа меньше  $3R$  на два - три порядка, что и объясняет отсутствие вклада электронного газа в теплоемкость в этом случае. Но при низких температурах ( $T < 1$  К), когда часть теплоемкости, обусловленная колебаниями решетки, резко уменьшается, изменяясь пропорционально  $T^3$ , вклад электронов в теплоемкость становится определяющим, и вблизи абсолютного нуля теплоемкость металла пропорциональна первой степени температуры.

**Выполнение работы.**

*Идея эксперимента.*

В настоящей работе делается попытка установления температурной зависимости теплоемкости методом охлаждения.

Металлический образец, имеющий температуру более высокую, чем температура окружающей среды, в этой среде охлаждается. Количество теплоты, теряемой образцом металла за малый промежуток времени  $\Delta t$ , может быть записано в виде:

$$q\Delta t = -\int\int c\rho \frac{dT}{dt} dV dt, \quad (7)$$

где  $c$  - теплоемкость металла,  $\rho$  - его плотность,  $T$  - температура, которая принимается одинаковой во всех точках образца в силу малости размеров образца и большей теплопроводности металла. Интегрирование здесь ведется по всему объему образца.

Это же количество теплоты  $q$  может быть выражено и по закону Ньютона:

$$q\Delta t = -\int\int \alpha(T - T_0) \cdot dS \cdot dt \quad (8)$$

где  $T_0$  - температура окружающей образец среды,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи. Здесь интегрирование ведется по всей поверхности образца.

Сравнивая выражения (7) и (8), получаем:

$$-\int\int c\rho \frac{dT}{dt} dV = -\int\int \alpha(T - T_0) \cdot dS$$

Учитывая, что величины  $\frac{dT}{dt}$ ,  $c$  и  $\rho$  не зависят от координат точек объема, а величины  $\alpha$ ,  $T$  и  $T_0$  зависят от координат точек поверхности образца, можно написать

$$-c\rho \frac{dT}{dt} V = -\alpha(T - T_0) S,$$

где  $V$  - объем образца,  $S$  - площадь его поверхности.

Написав полученное соотношение для двух образцов, полагая при этом, что  $S_1 = S_2$ ,  $T_1 = T_2$  и  $\alpha_1 = \alpha_2$  делением одного выражения на другое получим

$$C_1 = C_2 \frac{m_2 \left(\frac{dT}{dt}\right)_2}{m_1 \left(\frac{dT}{dt}\right)_1}$$

$m_1$  - масса первого образца,  $m_2$  - масса второго образца.

***Измерительная установка и методика измерений.***

Схема установки изображена на рис 1. Электродпечь смонтирована на стержне, по которому она может перемещаться вверх и вниз (на рис.1 стержень не показан). Образец

представляет собой цилиндр длиной 45 мм и диаметром 17 мм с высверленным с одного конца каналом. В этот канал помещают фарфоровую трубку, через которую пропущены проволока термопары. Концы термопары подведены к милливольтметру

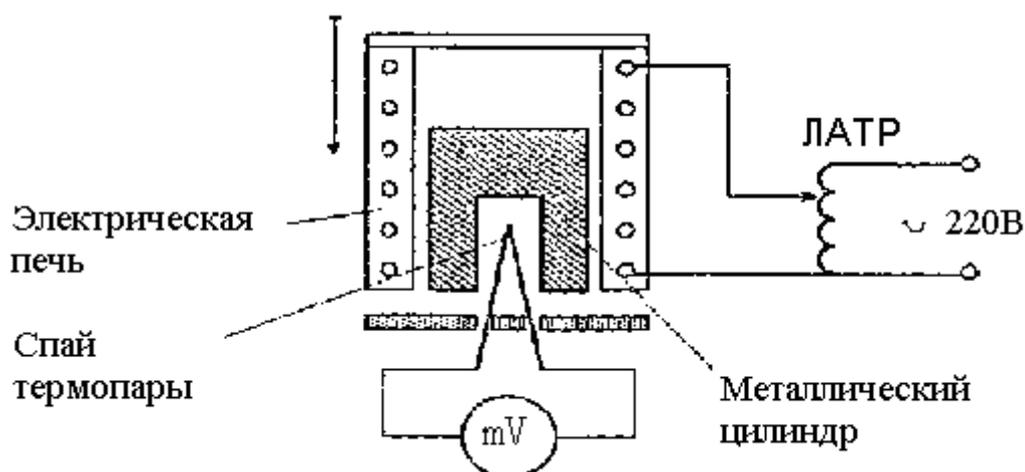


Рис. 1. Схема установки для измерения теплоемкости металлов методом охлаждения.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Соберите цепь по схеме (рис.1), где ЛАТР - лабораторный автотрансформатор (ручку регулировки напряжения установите перед работой на «0» напряжения. К концам термопары подключите милливольтметр, присоединив проводники к клеммам «-» и «mV». Отсчет снимать со шкалы «mV».

2. Взвесить исследуемые образцы из меди, алюминия, стали  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ .

$$m \text{ (сталь)} = 74.7 \text{ г.}$$

$$m \text{ (Al)} = 26.4 \text{ г.}$$

$$m \text{ (Cu)} = 86.0 \text{ г.}$$

3. Накройте выступающий из подставки конец термопары медным цилиндром. Осторожно, чтобы не сломать термопару, накройте весь образец печью и закрепите ее винтом.

4. Подайте через автотрансформатор на печь не более 150 - 180 В, проследите за показаниями пирометрического вольтметра, если стрелка прибора уходит за «0» шкалы влево, необходимо поменять концы проводников на нем местами.

5. Дать прогреться печи до 200 °С. Для определения температуры по показаниям милливольтметра необходимо пользоваться градуировочным графиком или градуировочной таблицей для термопары. Сбросить напряжение ЛАТРа до «0».

6. Осторожно, берясь за тепло изоляторы, отпустите винт, поднимите печь с образца и разверните её так, чтобы тепло от нее не достигало образца.

7. При прохождении стрелки через деление, соответствующее 600 °С включите секундомер, показания секундомера и милливольтметра записывайте каждые 50 – 60 °С, отсчеты температуры и времени охлаждения проводите до тех пор, пока температура образца не снизится до 75-50 °С. Данные отсчетов внести в таблицу №1. Повторить

эксперимент для всех образцов.

алю миний	t,сек									
	t, °C									
	T, К									
лат унь	t,сек									
	t, °C									
	T, К									
с галь	t,сек									
	t, °C									
	T, К									

По полученным данным построить график зависимости температуры охлаждения от времени  $T=f(t)$  рис.2.

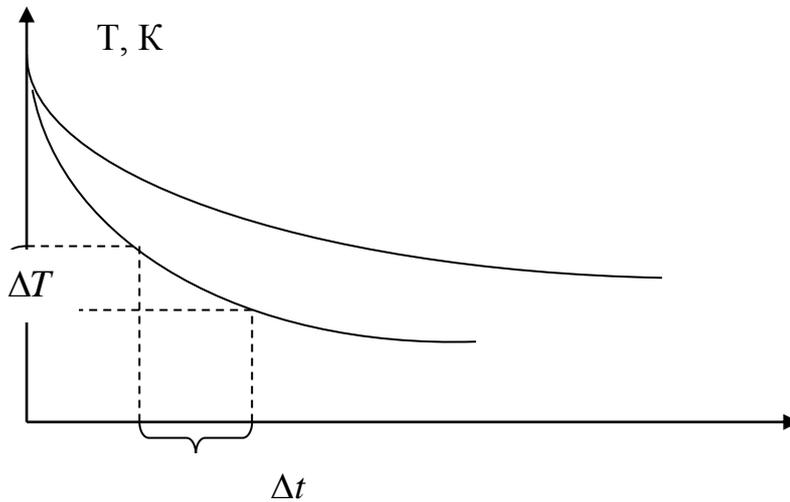


Рис. 2.

Построить график зависимости удельной теплоемкости алюминия от температуры  $C = t(T)$  по данным таблицы №1

T, К	2	4	6
	50	00	00
C,	8	9	1
Дж/кг К	58	51	037 (т)

8. Используя метод численного дифференцирования определить из графиков  $T=f(t)$  скорости охлаждения образцов  $\frac{dT}{dt}$  для 7-8 различные значений температуры. Метод численного дифференцирования заключается в следующем: для значения температуры  $T_k$ , необходимо выбрать интервал  $dT$  (10К) по графику определить соответствующий ему

интервал времени  $dt$ . Скорость охлаждения будет равна  $\frac{dT}{dt}$ .

9. Определить удельные теплоемкости латуни и стали по формуле

$$C_1 = C_2 \frac{m_2 \left(\frac{dT}{dt}\right)_2}{m_1 \left(\frac{dT}{dt}\right)_1}$$

где индекс «1» латуни и стали, «2» - алюминия.

$C_2$  - удельная теплоемкость меди, определяемая из графика для тех же значений.

10. Построить график зависимости удельной теплоемкости алюминия и стали от температуры.

Отчет предоставить в виде таблицы №1 графиков  $T=f(t)$ ,  $C=f(T)$  для латуни, алюминия и стали.

### ***Контрольные вопросы.***

1. Что такое теплоемкость?
2. Какие виды теплоемкости вы знаете?
3. Единицы измерения теплоемкости.
4. Какова связь между идеальной и молекулярной теплоемкостями?
5. Изложите основы классической теории теплоемкости кристаллов. Закон Дюлонга и Пти.
6. Изложите основы квантовой теории теплоемкости кристаллов. Закон Дебая.
7. Что такое температура Дебая, от чего она зависит?
8. В какой области зависимости  $C=f(T)$  расположена температура Дебая.
9. В чем заключается «метод охлаждения»?
10. Можно ли при помощи этого метода определить теплоемкость диэлектриков?

## Лабораторная работа № 17. Исследование космического излучения.

**Цель работы:** исследование: 1) зависимости интенсивности космического излучения от выбранного направления; 2) проникающей способности космического излучения.

**Оборудование:** установка для исследования космического излучения

**Указания мер безопасности:** 1. При работе с установкой необходимо выполнять общие правила работы с электрическими установками напряжением до  $1000V$  и требования безопасности для физической лаборатории.

2. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством, принципом действия и мерами безопасности.

3. Запрещается вскрывать корпус установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам.

4. После окончания работы с установкой следует отключить электропитание

### Краткая теория.

#### Космические лучи

Из мирового пространства на Землю непрерывно падает поток атомных ядер (в основном протонов) высокой энергии (в среднем  $\sim 10$  Гэв, энергия отдельных частиц достигает  $10^{10}$  Гэв<sup>1</sup>). Эти так называемые первичные космические лучи образуют в земной атмосфере вторичное излучение, в котором встречаются все известные в настоящее время элементарные частицы. Интенсивность первичных космических лучей на границе атмосферы составляет примерно  $1 \text{ частицу}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$ . Поток заряженных частиц на уровне моря равен в среднем  $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ частицу}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$ . Существование магнитного поля Земли приводит к тому, что интенсивность космических лучей меняется с широтой. Это явление называется широтным эффектом.

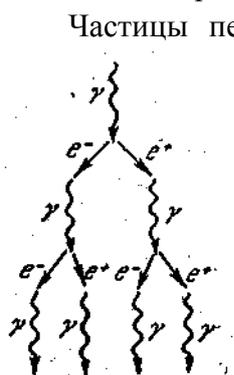


Рис.1

Частицы первичных космических лучей претерпевают неупругие столкновения с ядрами атомов в верхних слоях атмосферы, в результате чего возникает вторичное излучение. На высотах ниже 20 км космические лучи практически "полностью носят вторичный характер. В составе вторичных космических лучей имеются две компоненты. Одна из них сильно поглощается свинцом и поэтому была названа мягкой; вторая же проникает через большие толщи свинца и получила название жесткой.

Мягкая компонента состоит из каскадов или ливней электронно-позитронных пар. Возникший в результате ядерного превращения или резкого торможения быстрого электрона  $\gamma$ -фотон, пролетая вблизи атомного ядра, создаёт электронно-позитронную пару (рис.1). Торможение этих частиц снова приводит к образованию  $\gamma$ -фотонов, и т. д. Процессы рождения пар и возникновения  $\gamma$ -квантов чередуются друг с другом до тех пор, пока энергия  $\gamma$ -фотонов не станет недостаточной для образования пар. Поскольку энергия первоначального фотона бывает очень большой, успевает возникнуть много поколений вторичных частиц, прежде чем прекращается развитие ливня.

Жесткая, проникающая компонента космических лучей состоит в основном из мюонов. Ее образование происходит преимущественно в верхних и средних слоях атмосферы за счет

распада заряженных  $\pi$ -мезонов (и отчасти К-мезонов). Во время полетов искусственных спутников Земли и космических ракет были открыты вблизи Земли радиационные пояса, которые представляют собой две окружающие Землю зоны с резко повышенной интенсивностью ионизирующего излучения. Их существование обусловлено захватом и удержанием заряженных космических частиц магнитным полем Земли. В плоскости экватора внутренний пояс радиации простирается от 600 до 6000 км, внешний пояс – от 20 000 до 60 000 км. На широтах 60 -70° оба пояса приближаются к Земле на расстояние в несколько сот километров.

До недавнего времени космическое излучение было единственным источником частиц с энергией, достаточной для образования мезонов и гиперонов. Космические частицы, в первую очередь быстрые электроны, дали впервые возможность экспериментального исследования электромагнитных процессов при энергиях, превышающих миллиарды электронвольт. В космическом излучении были впервые обнаружены многие элементарные частицы (позитроны, пионы, мюоны, К-мезоны и гипероны). Исследования этого весьма слабого по своей интенсивности излучения стимулировали развитие многих новых экспериментальных методов и привели к важнейшим открытиям, существенно расширившим наши представления о природе элементарных частиц, о свойствах космического пространства и процессах в звездах, в которых генерируются космические лучи.

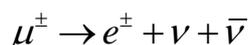
Интенсивность космического излучения у поверхности Земли зависит от направления измерений и приближенно может быть представлена формулой

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$

где  $I_0$  и  $I$  - интенсивности космического излучения в вертикальном направлении и под углом  $\varphi$  к вертикали. Такая зависимость обусловлена поглощением космических лучей в воздухе атмосферы, толщина которого минимальна в вертикальном направлении и растет с увеличением угла  $\varphi$ .

Жесткая компонента состоит из  $\mu$ -мезонов, которые слабо поглощаются веществом, притом приблизительно одинаково веществами с разными  $Z$ . Столь большое различие проникающей способности частиц обеих компонент связано с тем, что электроны и позитроны мягкой компоненты при взаимодействии с веществом тратят большую часть своей энергии на излучение, а потери  $\mu$ -мезонов на излучение сравнительно малы. Это объясняется тем, что количество излученной энергии пропорционально квадрату заряда и обратно пропорционально квадрату массы частицы, а мю-мезон примерно в 207 раз тяжелее электрона.

Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов вещества для электронов и  $\mu$ -мезонов космических лучей на уровне моря примерно одинаковы и сравнительно малы. Особенностью  $\mu$ -мезонов является их распад на электроны, нейтрино и антинейтрино:



В плотной среде поглощение  $\mu$ -мезонов обусловлено потерей энергии на ионизацию атомов среды. В газообразной среде пробег  $\mu$ -мезонов велик и нужно учитывать их выбывание из потока космических лучей за счет спонтанного распада. Можно считать, что основная часть мезонов рождается в верхних слоях атмосферы и имеет энергию 1-10 ГэВ.

Мю-мезоны, входящие в состав жесткой компоненты, возникают в результате распада  $\pi$ -мезонов - продуктов ядерного взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы:  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$ ,  $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ c}$

Следовательно,  $\mu$ -мезоны проходят почти весь слой атмосферы ( $\sim 900 \text{ г/см}^2$ ). При этом они частично поглощаются, частично распадаются. Мезоны, идущие под углом  $\theta$  к вертикали (рис. 72) и попадающие на уровень моря, проходят в атмосфере путь в  $1/\cos\theta$  раз больший, чем мезоны, идущие по вертикали. Поэтому вероятность распада для  $\mu$ -мезонов, идущих под углом  $\theta$ , больше. При увеличении угла  $\theta$  будет увеличиваться также слой воздуха, который должны пройти мезоны. Это приводит к увеличению поглощения за счет ионизационных потерь. Таким образом, оба фактора должны привести к уменьшению интенсивности  $\mu$ -мезонов с увеличением зенитного угла  $\theta$ .

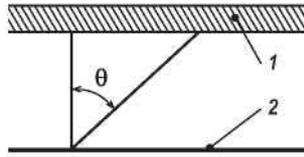


Рис.2. Генерация мезонов и путь их прохождения в атмосфере: 1 - слой генерации; 2 - уровень моря

Можно, однако, выделить ту часть мезонов, которые поглотились за счет увеличения количества вещества. Измерения интенсивности вертикального потока  $\mu$ -мезонов, выполненные на разных глубинах под землей, показали, что число  $\mu$ -мезонов  $N(x)$  уменьшается как функция количества пройденного плотного вещества  $x$  ( $\text{г/см}^2$ ) по следующему закону:

$$N(x) = \left( \frac{900}{900 + x} \right)^{1,6} = \left( \frac{900}{\xi} \right)^{1,6}$$

где  $\xi = 900 + x$  - полное количество вещества, пройденного  $\mu$ -мезоном от места генерации до места поглощения (масса вертикального столба воздуха принята равной  $900 \text{ г/см}^2$ ). Из рис.1 видно, что  $\xi = 900/\cos\theta$ . Таким образом, число мезонов, дошедших до счетчика на уровне моря, уменьшается за счет поглощения в веществе по закону

$$P_1(\theta) \propto (\cos\theta)^{1,6} \quad (1)$$

С увеличением длины пути, пройденного мезоном, увеличивается вероятность распада мезона. Вероятность прохождения мезоном пути  $l$  без распада равна

$$P_2(\theta) = \exp\left(-\frac{l(\theta)}{L}\right) \quad (2)$$

где  $L = \nu\tau$  - длина распадного пробега;  $\nu = \beta c$  - скорость мезона;  $\tau$  - время жизни движущегося мезона. Из релятивистской механики известно, что

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где  $\tau_0$  - время жизни покоящегося мезона. Тогда

$$L = \beta c \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \beta c \tau_0 \frac{E_\mu}{m_\mu c^2}, \quad (3)$$

где  $E_\mu = m_\mu c^2 / \sqrt{1-\beta^2}$  - полная энергия мезона,  $E_\mu$  можно принять равной  $2 \cdot 10^9$  эВ;  $m_\mu$  - масса мезона, которая в энергетических единицах составляет 105,8 МэВ/с<sup>2</sup>.

Отношение числа мезонов, идущих под зенитным углом  $\theta$ , к числу вертикально падающих мезонов можно записать в виде

$$\frac{N(\theta)}{N(0^\circ)} = \frac{P_1(\theta)}{P_1(0^\circ)} \frac{P_2(\theta)}{P_2(0^\circ)} = (\cos \theta)^{1,6} \frac{e^{-l(\theta)/L}}{e^{-l_0/L}} \quad (4)$$

где  $P_1(\theta)$  и  $P_2(\theta)$  определены формулами (1) и (2). Можно считать, что по вертикали мезоны проходят путь  $l_0 = 15$  км. Путь мезонов под углом  $\theta$  равен

$$l(\theta) = \frac{l_0}{\cos \theta} \quad (5)$$

Воспользовавшись формулами (3) и (5), а также экспериментально определенным отношением  $N(\theta)/N(0^\circ)$ , с помощью формулы (4) можно получить значение  $\tau_0$ .

Нужно помнить, что проведенные расчеты дают значение  $\tau_0$  только по порядку величины, поскольку они не учитывают, как меняется вероятность распада  $\mu$ -мезонов из-за уменьшения их энергии вследствие ионизационного торможения. Такой учет усложнил бы формулы, однако изменил бы результат примерно в два раза.

#### **Указания по выполнению работы**

В настоящей работе изучаются вторичные космические лучи, их состав и угловое распределение жесткой компоненты. Работа выполняется с помощью «телескопа», состоящего из двух детекторов, включенных на совпадения (см. блок-схему на рис.2). Космические частицы регистрируются детекторами 1 и 2. Если частица пройдет через оба детектора (частица а), то схема совпадений 3 вырабатывает импульс. Если частица проходит через один из детекторов и не попадает во второй детектор (частица б), тогда схема совпадений импульс не вырабатывает. Таким образом, число импульсов, сосчитанных пересчетным прибором 4, будет равно числу частиц, прошедших через оба детектора и зарегистрированных ими.

**Задание 1.** Изучение состава космических лучей. В этой части работы надо показать, что наблюдаемые на уровне моря космические лучи состоят из двух резко отличающихся по своим свойствам компонент - мягкой и жесткой - и найти отношение интенсивностей обеих компонент.

В отсутствии поглощающих фильтров между детекторами установка будет регистрировать частицы как жесткой, так и мягкой компонент космического излучения. Если же между детекторами помещать поглотители (например, свинец), тогда частицы мягкой компоненты будет поглощаться в поглотителе. Это приведет к заметному уменьшению скорости счета совпадений. Начиная с некоторой толщины поглотителя снижение скорости счета по мере увеличения толщины поглотителя становится незаметным.

Это соответствует регистрации только жесткой компоненты космических лучей. Зависимость скорости счета  $N$  от толщины поглотителя  $x$  называется кривой поглощения.

По кривой поглощения определяются интенсивности мягкой  $I_M$  и жесткой  $I_J$  компонент.

Для этого прямолинейную часть, соответствующую жесткой компоненте, продолжают до пересечения с осью ординат. Это дает величину  $I_J$  (рис.3). Оставшаяся часть соответствует  $I_M$ . Для более точного определения  $I_J$  и  $I_M$  необходимо вычитать из общего числа совпадений число случайных совпадений.

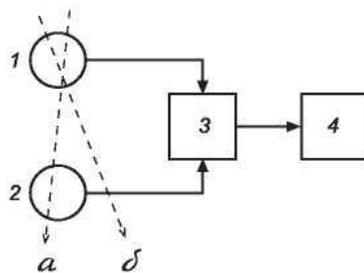


Рис.3. Блок-схема лабораторной установки для изучения космических лучей

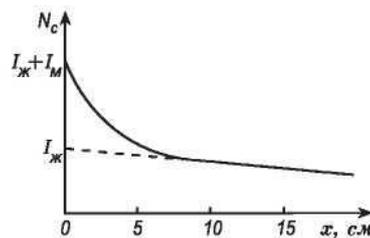


Рис.4. Кривая поглощения фильтром космических лучей

Задание 2. Изучение углового распределения жесткой компоненты космических лучей и определение времени жизни  $\mu$ -мезона<sup>10</sup>. В этой части работы можно воспользоваться установкой, используемой в первой части с тем дополнением, что телескоп детекторов можно поворачивать вокруг оси на заданный угол по отношению к вертикали. Для изучения жесткой компоненты космических лучей между детекторами следует поместить свинцовый фильтр толщиной не менее 10 см. При расположении установки внутри здания роль фильтра играют бетонные перекрытия, и свинцовый фильтр не нужен.

При помощи установки найти угловую зависимость интенсивности жесткой компоненты космических лучей, т. е. зависимость счета совпадений  $N$  от зенитного угла  $\theta$  (в том числе для  $\theta = 0^\circ$ ). Измерения счета совпадений надо производить с как можно большей статистической точностью.

Длину распадного пробега и время жизни  $\mu$ -мезона определить одним из способов, указанных ниже.

В отчете представить блок-схему установки с описанием опытов, таблицы измерений и графики, значения интенсивностей жесткой и мягкой компонент космических лучей, значение энергии мезонов, использованное в расчетах, значение длины распадного пробега, вычисленное время жизни  $\mu$ -мезона.

#### **Указания по обработке данных и вычислениям**

Обычно из общего числа совпадений необходимо вычитать число случайных совпадений. Число случайных совпадений определяется по формуле

$$N_{сл} = 2t_{разр} N_1 N_2,$$

где  $t_{разр}$  - разрешающее время схемы совпадений;  $N_1$  и  $N_2$  - число импульсов, сосчитанных отдельно первым и вторым детекторами (каналами).

Таблица. Результаты измерений.

$\theta$	$N_{изм}(\theta)$	$N_{изм}(\theta) - N_{сл}$	$N_{изм}(\theta) - N_{сл} - N_{л}$

В результаты измерений под углами  $\theta > 50^\circ$  необходимо внести поправку за счет ливней  $N_{л}$  из стен и потолка помещения. В качестве числа таких ливней берут число совпадений при угле  $90^\circ$  (за вычетом случайных совпадений). Результаты измерений заносят в таблицу. Для оценки времени жизни  $\mu$ -мезона, надо построить график функции  $\frac{N_{изм}(\theta) - N_{сл} - N_{л}}{N_{изм}(0^\circ) - N_{сл}}$  в зависимости от угла  $\theta$  и сравнить его с графиком функции  $(\cos \theta)^{1,6}$ , характеризующей уменьшение интенсивности жесткой компоненты космических лучей лишь за счет ионизационных потерь. По величине  $N(\theta)/N(0^\circ)$ , взятой из экспериментального графика для некоторого угла (например,  $\theta = 60^\circ$ ) можно оценить значение  $\tau_0$ . Вычислить значение  $\tau_0$  и оценить погрешность результата можно при помощи метода наименьших квадратов. Для этого нужно аппроксимировать экспериментальную кривую  $N_{изм}(\theta) - N_{сл} - N_{л}$  соответствующей функцией (см. формулы (3) - (5)). Как видно, в таком подходе не обязательно знать  $N_{изм}(0^\circ)$ , поскольку эта величина является варьируемым параметром и определяется из подгонки.

### Контрольные вопросы

1. Состав и энергия первичных космических лучей.
2. Мягкая и жесткая компоненты космических лучей.
3. Механизм образования мезонов в космических лучах. Характеристики распада  $\pi$ - и  $\mu$ -мезонов.
4. Почему электроны и позитроны космических лучей относятся к «мягкой» компоненте и поглощаются целиком приблизительно в 10 см свинца, а  $\mu$ -мезоны той же энергии относятся к «жесткой» компоненте и свободно проходят через этот слой?
5. Время жизни  $\mu$ -мезонов, учет эффекта, следующего из специальной теории относительности.
6. Зависимость вероятности поглощения и распада от расстояния, пройденного  $\mu$ -мезонами в атмосфере.
7. Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы по изучению космических лучей.
8. Методика обработки данных, учет ливней от стен и числа случайных совпадений. Определение времени жизни  $\mu$ -мезона и погрешности полученного результата.

## Приложение 1. Справочные материалы по физике.

### 1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Универсальная газовая постоянная		
Молярный объем*	$R$	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$V_m$	$22,4 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> /моль
Элементарный заряд	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Скорость света в вакууме	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Стефана-Больцмана	$c$	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная закона смещения	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Вина		
Постоянная Планка	$b$	$2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Дирака	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$\hbar$	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Первый боровский радиус	$R$	$1,10 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Комптоновская длина волны	$a$	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Магнетон Бора	$\lambda$	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Энергия ионизации атома водорода	$\mu_B$	$0,927 \cdot 10^{-23}$ А·м <sup>2</sup>
Атомная единица массы	$E_i$	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)
Электрическая постоянная	а.е.м.	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Магнитная постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

\*Молярный объем идеального газа при нормальных условиях.

## 2. Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м

## 3. Плотность твердых тел

Твердое тело	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Твердое тело	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Алюминий	$2,70 \cdot 10^3$	Медь	$8,93 \cdot 10^3$
Барий	$3,50 \cdot 10^3$	Никель	$8,90 \cdot 10^3$
Ванадий	$6,02 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Висмут	$9,80 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Железо	$7,88 \cdot 10^3$	Цезий	$1,90 \cdot 10^3$
Литий	$0,53 \cdot 10^3$	Цинк	$7,15 \cdot 10^3$

## 4. Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Жидкость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Вода (при 4 °С)	$1,00 \cdot 10^3$	Сероуглерод	$1,26 \cdot 10^3$
Глицерин	$1,26 \cdot 10^3$	Спирт	$0,80 \cdot 10^3$
Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$		

### 5. Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Газ	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Водород	0,09	Гелий	0,18
Воздух	1,29	Кислород	1,43

### 6. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей

Жидкость	Коэффициент, мН/м	Жидкость	Коэффициент, мН/м
Вода	72	Ртуть	500
Мыльная пена	40	Спирт	22

### 7. Эффективный диаметр молекулы

Газ	Диаметр, м	Газ	Диаметр, м
Азот	$3,0 \cdot 10^{-10}$	Гелий	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Водород	$2,3 \cdot 10^{-10}$	Кислород	$2,7 \cdot 10^{-10}$

### 8. Диэлектрическая проницаемость

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Вода	81	Стекло	7,0
Масло трансформаторное	2,2	Слюда	7,0
Парафин	2,0	Фарфор	5,0
		Эбонит	3,0

### 9. Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление, Ом·м	Металл	Удельное сопротивление, Ом·м
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$

### 10. Энергия ионизации

Вещество	$E_i$ , Дж	$E_i$ , эВ
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

### 11. Подвижность ионов в газах, м<sup>2</sup>/ (В·с)

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
Водород	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$
Воздух	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$

### 12. Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50
Масло коричное	1,6	Сероуглерод	1,63

### 13. Работа выхода электронов

Металл	$A$ , Дж	$A$ , эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Платина	$10 \cdot 10^{-19}$	6,3
Рубидий	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цезий	$3,2 \cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

### 14. Относительные атомные массы (округленные значения) $A_r$ и порядковые номера $Z$ некоторых элементов

Элемент	Символ	$A_r$	Элемент	Символ	$A_r$
Азот	N	14	Марганец	Mn	55
Алюминий	Al	27	Медь	Cu	64
Аргон	Ar	40	Молибден	Mo	96
Барий	Ba	137	Натрий	Na	23
Ванадий	V	60	Неон	Ne	20
Водород	H	1	Никель	Ni	59
Вольфрам	W	184	Олово	Sn	119
Гелий	He	4	Платина	Pt	195
Железо	Fe	56	Ртуть	Hg	201
Золото	Au	197	Сера	S	32
Калий	K	39	Серебро	Ag	108
Кальций	Ca	40	Углерод	C	12
Кислород	O	16	Уран	U	238
Магний	Mg	24	Хлор	Cl	35

### 15. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	$m_0$		$E_0$	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный $\pi$ -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

### 16. Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	${}_{89}^{225}Ac$	10 сут.
Йод	${}_{53}^{131}I$	8 сут.
Кобальт	${}_{27}^{60}Co$	5,3 г
Магний	${}_{12}^{27}Mg$	10 мин
Радий	${}_{86}^{226}Ra$	1620 лет
Радон	${}_{86}^{222}Rn$	3,8 сут.
Стронций	${}_{38}^{90}Sr$	27 лет
Фосфор	${}_{15}^{32}P$	14,3 сут.
Церий	${}_{58}^{144}Ce$	285 сут.

### 17. Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.
Нейтрон	${}^1_0n$	1,00867	Бор	${}^9_5B$ ${}^{10}_5B$ ${}^{11}_5B$	9,01333 10,01294 11,00931
Водород	${}^1_1H$ ${}^2_1H$ ${}^3_1H$	1,00783 2,01410 3,01605	Углерод	${}^{10}_6C$ ${}^{12}_6C$ ${}^{13}_6C$ ${}^{14}_6C$	10,00168 12,00000 13,00335 14,00324
Гелий	${}^3_2He$ ${}^4_2He$	3,01603 4,0026	Азот	${}^{14}_7N$	14,00307
Литий	${}^6_3Li$ ${}^7_3Li$	6,01513 7,01601	Кислород	${}^{16}_8O$ ${}^{17}_8O$	15,99491 16,99913
Бериллий	${}^7_4Be$ ${}^9_4Be$ ${}^{10}_4Be$	7,01693 9,01219 10,01354	Фтор	${}^{19}_9F$	18,99840

## 18. Тепловые свойства веществ.

### ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Вещество	Удельная теплоемкость, кДж/(кг К)	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
Алюминий	0,88	600	380
Лед	2,1	0	330
Медь	0,38	1083	180
Олово	0,23	232	59
Свинец	0,13	327	25
Серебро	0,23	960	87
Сталь	0,46	1400	82

### ЖИДКОСТИ

Вещество	Удельная теплоемкость, кДж/(кг К)	Температура кипения, °С	Удельная теплота парообразования
Вода	4,2	100	2,3
Ртуть	0,12	357	0,29
Спирт	2,4	78	0,85

### ГАЗЫ

Вещество	Удельная теплоемкость, кДж/(кг К)	Температура конденсации, °С
Азот	1,0	-196
Водород	14	-252
Воздух	1,0	-
Кислород	0,92	-183

Приложение 2. Справочные материалы по математике.

<p>Корни квадратного уравнения <math>ax^2 + bx + c = 0</math>:</p> $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ <p>Теорема Виета:</p> $x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}, \quad x_1 x_2 = \frac{c}{a}.$	
$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$ $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$ $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ $\sec^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha = 1$ $\operatorname{csc}^2 \alpha - \operatorname{ctg}^2 \alpha = 1$ $\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1$ $\sin \alpha \cdot \operatorname{csc} \alpha = 1$ $\cos \alpha \cdot \sec \alpha = 1$	$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$ $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$ $\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta}{1 \mp \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$ $\operatorname{ctg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta \mp 1}{\operatorname{ctg} \beta \pm \operatorname{ctg} \alpha}$ $\sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha$ $\cos 3\alpha = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$
$\sin \alpha = 1 / \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}$ $\cos \alpha = 1 / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$ $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$ $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$ $\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$	$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\operatorname{tg} \alpha \mp \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}.$
$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}$ $\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$ $\sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{2}$ $\cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$	$2 \sin \alpha \cdot \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$ $2 \cos \alpha \cdot \cos \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)$ $2 \sin \alpha \cdot \cos \beta = \sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)$

### Свойства тригонометрических функций.

$$\sin(-x) = -\sin x,$$

$$\cos(-x) = \cos x,$$

$$\operatorname{tg}(-x) = -\operatorname{tg} x,$$

$$\operatorname{ctg}(-x) = -\operatorname{ctg} x,$$

$$\sin(x + 2\pi k) = \sin x,$$

$$\cos(x + 2\pi k) = \cos x,$$

$$\operatorname{tg}(x + 2\pi k) = \operatorname{tg} x,$$

$$\operatorname{ctg}(x + 2\pi k) = \operatorname{ctg} x,$$

где  $k$  – любое целое число.

### Таблица значений тригонометрических функций некоторых углов.

Функция	Аргумент $\alpha$						
	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$	$\frac{3\pi}{2}$
$\sin \alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	0	-1
$\cos \alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	-1	0
$\operatorname{tg} \alpha$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	–	0	–
$\operatorname{ctg} \alpha$	–	$\sqrt{3}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	–	0

*Примечание:* Связь между градусной и радианной мерами измерения угла:

$$1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ рад}$$

**Теорема синусов:**  $\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$ , где  $a, b, c$  – длины сторон треугольника.

**Теорема косинусов:**  $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$ .

**Уравнение прямой:**  $Ax + Bx + C = 0$ , где  $A, B, C$  – любые вещественные числа,  $A^2 + B^2 \neq 0$ .  
 $y = kx + b$  – уравнение прямой с угловым коэффициентом  $k$ .

**Каноническое уравнение эллипса:**  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ , где  $a, b$  – полуоси.

**Разложение на множители:**

$$a^2 - b^2 = (a - b)(a + b),$$

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2,$$

$$a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2), \quad (a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

## 2. Таблица производных

Функция	Производная	Функция	Производная
$1/x$	$-1/x^2$	$\sin x$	$\cos x$
$\sqrt{x}$	$1/(2\sqrt{x})$	$\cos x$	$-\sin x$
$x^n$	$nx^{n-1}$	$\operatorname{tg} x$	$1/\cos^2 x$
$e^{nx}$	$ne^{nx}$	$\operatorname{ctg} x$	$-1/\sin^2 x$
$a^x$	$a^x \ln a$	$\arcsin x$	$1/\sqrt{1-x^2}$
$\ln x$	$1/x$	$\arccos x$	$-1/\sqrt{1-x^2}$
$\frac{u(x)}{v(x)}$	$\frac{vu' - v'u}{v^2}$	$\operatorname{arctg} x$	$1/(1+x^2)$
$uv$	$vu' + v'u$	$\operatorname{arcctg} x$	$-1/(1+x^2)$

## 3. Некоторые постоянные числа и приближенные формулы.

Постоянные числа	Приближенные формулы (при $\alpha \ll 1$ )
$\pi = 3,141$	$(1 \pm \alpha)^n \approx 1 \pm n\alpha$
$\pi^2 = 9,8696$	$e^\alpha \approx 1 + \alpha$
$\sqrt{\pi} = 1,7725$	$\ln(1 + \alpha) \approx \alpha$
$e = 2,7183$	$\sin \alpha \approx \alpha$
$\lg e = 0,4343$	$\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2 / 2$
$\ln 10 = 2,3026$	$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$

#### 4. Таблица интегралов.

$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}, n \neq 1$	$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x$
$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a}$	$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x$	$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x$
$\int \sin x dx = -\cos x$	$\int \frac{dx}{a^2+x^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a}$
$\int \cos x dx = \sin x$	$\int \frac{dx}{x^2-a^2} = \frac{1}{2a} \ln \left  \frac{x-a}{x+a} \right $
$\int \operatorname{tg} x dx = -\ln  \cos x $	$\int \frac{dx}{a^2-x^2} = \frac{1}{2a} \ln \left  \frac{x+a}{x-a} \right $
$\int \operatorname{ctg} x dx = \ln  \sin x $	$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \operatorname{arcsin} x$
$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln \left  \operatorname{tg} \frac{x}{2} \right $	$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \operatorname{arcsin} \frac{x}{a}$
$\int \frac{dx}{\cos x} = \ln \left  \operatorname{tg} \left( \frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right $	$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2-1}} = \ln(x + \sqrt{x^2-1})$
$\int \sin^2 x dx = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\sin 2x$	$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm k}} = \ln \left  x + \sqrt{x^2 \pm k} \right $
$\int \cos^2 x dx = \frac{1}{2}x + \frac{1}{4}\sin 2x$	$\int e^x dx = e^x$
$\int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$	$\int_0^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 2,405$
$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$	$\int u dv = u \cdot v - \int v du$
$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$	

## 5. Некоторые сведения о векторах.

Скалярное произведение векторов:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

Векторное произведение векторов:

$$[\vec{a} \vec{b}] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - a_z b_y) \vec{i} + (a_z b_x - a_x b_z) \vec{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \vec{k}$$

$$\vec{a} [\vec{b} \vec{c}] = \vec{b} [\vec{c} \vec{a}] = \vec{c} [\vec{a} \vec{b}]$$

$$[\vec{a} [\vec{b} \vec{c}]] = \vec{b} (\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c} (\vec{a} \cdot \vec{b})$$

$$\frac{d}{dt} (\vec{a} + \vec{b}) = \frac{d\vec{a}}{dt} + \frac{d\vec{b}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} (\alpha \vec{a}) = \frac{d\alpha}{dt} \vec{a} + \alpha \frac{d\vec{a}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} (\vec{a} \vec{b}) = \frac{d\vec{a}}{dt} \vec{b} + \vec{a} \frac{d\vec{b}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} [\vec{a} \vec{b}] = \left[ \frac{d\vec{a}}{dt} \vec{b} \right] + \left[ \vec{a} \frac{d\vec{b}}{dt} \right]$$

## **Учебно методическое и информационное обеспечение дисциплины:**

### **Рекомендуемая литература**

#### **Основная литература:**

1. Дмитриева Е.И. Физика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.И. Дмитриева. — 2-е изд. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. — 143 с. — 978-5-4486-0445-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/79822.html>

2. Никеров, В.А. Физика: современный курс : учебник / В.А. Никеров. - 2-е изд. - Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2016. - 452 с. : ил. - ISBN 978-5-394-02349-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=453287>

#### **Дополнительная литература:**

1. Романова, В.В. Физика: примеры решения задач : учебное пособие / В.В. Романова. - Минск : РИПО, 2017. - 348 с. : схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-985-503-737-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=487974>

2. Никеров, В.А. Физика для вузов: механика и молекулярная физика : учебник / В.А. Никеров. - Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2017. - 136 с. : табл., граф., схем. - ISBN 978-5-394-00691-3 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=450772>

3. Летута С.Н. Физика [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.Н. Летута, А.А. Ча-как. — Электрон. текстовые данные. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 307 с. — 978-5-7410-1575-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/78852.html>**Интернет-ресурсы:**

1. <http://physics.nad.ru> – физика в анимациях.