

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

**УТВЕРЖДАЮ**

Зав. кафедрой «Физики, электротехники  
и электроэнергетики»

\_\_\_\_\_ А.В. Пермяков

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г

**Методические указания к лабораторным работам по дисциплине  
«Физика»**

Направление подготовки	10.03.01 Информационная безопасность
Профиль подготовки	Информационные системы и технологии
Квалификация выпускника	бакалавр
Форма обучения	очная
Учебный план	2020
Изучается в	2 семестр

Пятигорск 2020 г.

Содержание	Стр.
Введение.	3
Инструкция по технике безопасности	5
Тематический план лабораторных работ	6
Описание лабораторных работ	7
Л.Р.1. Определение плотности твёрдых тел правильной геометрической формы	7
Л.Р.2. Определение скорости полёта пули методом физического маятника	10
Л.Р.3. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом падающего шарика (метод Стокса).	14
Л.Р.4. Измерение сопротивления с помощью моста Уитстона.	19
Л.Р.5. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона..	26
Л.Р.6. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	32
Л.Р.7. Проверка закона Малюса.	41
Л.Р.8. Изучение зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры.	47
Л.Р.9. Изучение космического излучения.	51
Приложение 1. Справочные материалы по физике	59
Приложение 2. Справочные материалы по математике	67
Учебно методическое и информационное обеспечение дисциплины.	72

## Введение.

Дисциплина «Физика» относится к базовой части. Ее освоение происходит в 1 семестре. ОП ВО подготовки бакалавра направления 10.03.01 Информационная безопасность. 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 10.03.01 Информационная безопасность

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:

ОПК-1	Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности
-------	---

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.
УМЕТЬ	выявлять физическую сущность явлений и процессов в устройствах различной физической природы и выполнять применительно к ним простые технические расчёты.
ВЛАДЕТ Ь	инструментарием для решения математических, физических задач в своей предметной области; методами анализа физических явлений в технических устройствах и системах.

При подготовке и в процессе выполнения лабораторных работ перед студентами ставится задача усвоения теоретического материала и изучения на опыте основных физических явлений. Эксперименты с их многочисленными источниками ошибок не всегда соответствуют точным теоретическим выводам, поэтому при выполнении работ от студентов требуется не только умение

обращаться с лабораторным оборудованием, но и определённое искусство экспериментирования, позволяющее учитывать многочисленные внешние и внутренние факторы для достижения достоверных результатов.

Представленные в пособии работы охватывают все разделы теоретического материала и являются необходимым дополнением, повышающим качество образовательного процесса, так как способствует развитию исследовательских навыков у студентов.

Изложенные в лабораторных работах краткие теоретические сведения по данной теме, цель работы, оборудование и принадлежности, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы, а также приведённые в приложении справочные материалы по физике и математике достаточно полно охватывают необходимый для подготовки материал..

Методические указания по выполнению лабораторных 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 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;
  - 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
<b>Раздел 1. Механика</b>		<b>6</b>
<b>1</b>	Определение плотности твёрдых тел правильной геометрической формы	3
<b>2</b>	Определение скорости полёта пули методом физического маятника	3
<b>Раздел 2. Основы молекулярно-кинетической теории и термодинамика</b>		<b>3</b>
<b>3</b>	Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом падающего шарика (метод Стокса).	3
<b>Раздел 3. Электричество.</b>		<b>3</b>
<b>4</b>	Измерение сопротивления с помощью моста Уитстона.	3
<b>Раздел 4. Магнетизм. Электромагнитные колебания и волны.</b>		<b>6</b>
<b>5</b>	Определение удельного заряда электрона методом магнетрона	3
<b>6</b>	Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.	3
<b>Раздел 5. Волновая и квантовая оптика. Теория атома водорода по Бору.</b>		<b>3</b>
<b>7</b>	Проверка закона Малюса.	3
<b>Раздел 6. Элементы квантовой механики и ядерной физики</b>		<b>6</b>
<b>8</b>	Изучение зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры.	3
<b>9</b>	Изучение космического излучения.	3
<b>Итого за 2 семестр</b>		<b>27</b>
<b>Итого</b>		<b>27</b>

## Описание лабораторных работ

### Лабораторная работа № 1. Определение плотности твёрдых тел правильной геометрической формы.

**Цель работы:** определить плотности тел правильной формы и оценить точность проведенных измерений.

**Оборудование:** измеряемые тела, штангенциркуль, весы, разновесы.

#### Краткая теория

Плотностью вещества называется физическая величина, определяемая как отношение массы тела  $m$  к его объему  $V$ :

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Единицы измерения плотности  $\text{г/см}^3$  и  $\text{кг/м}^3$ . Соотношение между ними:

$$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1 \frac{10^{-3} \text{ кг}}{10^{-6} \text{ м}^3} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

На практике плотность используют для определения массы или объема тел. Кроме того, плотность служит параметром для определения целого ряда других физических характеристик веществ.

#### Выполнение работы

Необходимо измерить плотности следующих тел: стальные цилиндры разного размера, алюминиевый цилиндр, бруски из различного материала (дерево, текстолит) разного размера, имеющие форму параллелепипеда.

1. Взвешиванием тела на весах определите массы тел, выразите их в граммах.

2. Измерьте штангенциркулем линейные размеры тел и вычислите их объемы  $V$ , выраженные в  $\text{см}^3$ . Объем цилиндра находится по формуле

$$V_{\text{цил}} = \pi d^2 h / 4, \quad (2)$$

где  $d$  и  $h$  – диаметр и высота цилиндра. Объем параллелепипеда находится по формуле

$$V_{\text{пар}} = l b h, \quad (3)$$

где  $l$ ,  $b$ ,  $h$  – линейные размеры параллелепипеда (длина, ширина и высота).

(Измерения проводить каждой величины 5 раз.)

3. В таблицу 1 занесите данные для тел цилиндрической формы, в таблицу 2 занесите данные для тел в форме параллелепипеда.

Таблица 1

Вещество	$m,$	$h,$	$d,$	$V,$	$\Delta V,$	$\rho,$	$\rho,$	$\Delta\rho,$	$\Delta\rho,$	$\varepsilon,$	$\varepsilon_V,$	$\varepsilon_\rho,$
	г	см	см	см <sup>3</sup>	см <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	%	%	%

Таблица 2

Вещество	$m,$	$l,$	$b,$	$h,$	$V,$	$\Delta V,$	$\rho,$	$\rho,$	$\Delta\rho,$	$\Delta\rho,$	$\varepsilon_m,$	$\varepsilon_V,$	$\varepsilon_\rho,$
	г	см	см	см	см <sup>3</sup>	см <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	%	%	%

4. По формуле (1) вычислите плотность тел в г/см<sup>3</sup> и в кг/м<sup>3</sup>.

5. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности, измеряемых величин в соответствии с правилами, указанными в лабораторной работе №1. Согласно (1) абсолютная погрешность плотности зависит от абсолютных погрешностей массы  $\Delta m$  и объёма  $\Delta V$ :

$$\Delta\rho = \frac{1}{2} \left( \frac{m + \Delta m}{V - \Delta V} - \frac{m - \Delta m}{V + \Delta V} \right) = \frac{(m + \Delta m)(V + \Delta V) - (m - \Delta m)(V - \Delta V)}{2V^2} =$$

$$= \frac{m\Delta V + V\Delta m}{V^2} \quad (4)$$

(При вычислении мы пренебрегали произведением абсолютных погрешностей  $\Delta m \cdot \Delta V$  и  $\Delta V \cdot \Delta V$ , т.к. они дают ничтожный вклад в общую сумму.)

Относительная погрешность плотности согласно (1) и (4) равна

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_m + \varepsilon_V \quad (5)$$

т.е. сумме относительных погрешностей массы и объёма.

Абсолютная погрешность измерения массы определяется погрешностью измерения весов:  $\Delta m = 5$  мг ( $5 \cdot 10^{-3}$  г), тогда относительная погрешность

$$\varepsilon_m = \Delta m / m. \quad (6)$$

Погрешность измерения объёма зависит от точностей измерений линейных размеров тел. Погрешность измерения штангенциркулем составляет половину цену деления, т.е. 0,05 мм ( $5 \cdot 10^{-3}$  см), таким образом

$$\Delta d = \Delta h = \Delta l = \Delta b = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

В случае цилиндра согласно (2)

$$\Delta V_{\text{цил}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{4} (h + \Delta h)(d + \Delta d)^2 - \frac{\pi}{4} (h - \Delta h)(d - \Delta d)^2 \right) = \frac{\pi}{4} (2hd\Delta d + d^2\Delta h)$$

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V_{\text{цил}}}{V_{\text{цил}}} = \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} \quad (7)$$

В случае параллелепипеда согласно (3)



$$\Delta V_{нар} = \frac{1}{2}((l + \Delta l)(b + \Delta b)(h + \Delta h) - (l - \Delta l)(b - \Delta b)(h - \Delta h)) = lb\Delta h + lh\Delta b + bh\Delta l$$

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V_{нар}}{V_{нар}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h} \quad (8)$$

Относительные погрешности переведите в проценты и занесите в таблицу.

Абсолютную погрешность плотности можно вычислить либо по формуле (4), либо через относительную погрешность, найденную по формуле (5):

$$\Delta \rho = \rho \cdot \varepsilon_\rho \quad (9)$$

Сравните полученные вами значения плотности с табличными значениями: плотность стали 7,87 г/см<sup>3</sup>, алюминия 2,70 г/см<sup>3</sup>, дерева (сосна) 0,4 г/см<sup>3</sup>, дерева (дуб) 0,7 г/см<sup>3</sup>, текстолита 1,5 г/см<sup>3</sup>.

### Контрольные вопросы.

1. Что такое «плотность»? Для чего вводится эта величина?
2. В каких единицах измеряется плотность?
3. Как определяется плотность тела в данной работе?
4. Приведите примеры плотностей различных веществ (не менее 8).

## Лабораторная работа № 2. 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.

### Краткая теория

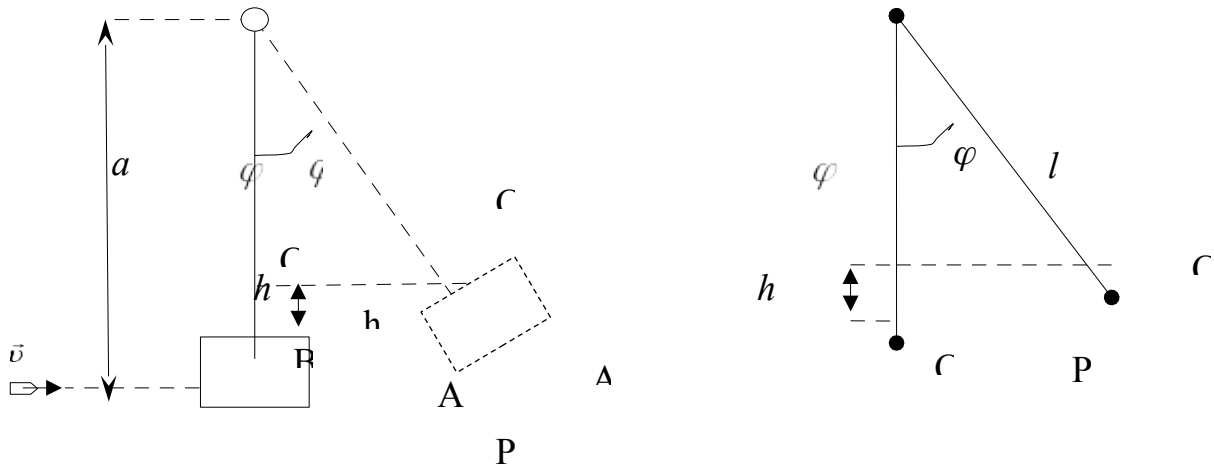
Физический маятник состоит из уловителя ("А" на рис.1) в виде цилиндра, заполненного пластичным материалом, который закреплен на стержне, способном свободно, с очень малым трением, качаться вместе с уловителем вокруг неподвижной оси. На рис.1 эта ось вращения (точка "О") перпендикулярна к плоскости рисунка. 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:

$$mva = (I + ma^2)\omega_0, \quad 11 \setminus * \text{MERGEFORMAT } ()$$

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:

$$E_k = \frac{(I + ma^2)\omega_0^2}{2} \quad 22\backslash* \text{MERGEFORMAT } ()$$

$$E_n = \left( M + m\frac{a}{l} \right) gh \quad 33\backslash* \text{MERGEFORMAT } ()$$

$E_k = E_n$ , следовательно

$$\frac{(I + ma^2)\omega_0^2}{2} = \left( M + m\frac{a}{l} \right) gh \quad 44\backslash*$$

MERGEFORMAT ()

где  $M$  – масса баллистического маятника,  $h$  – высота максимального поднятия его центра масс в точке остановки,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – 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  $O$  до центра масс маятника  $C$ . Итак, мы получили уравнение

$$\frac{1}{2}(ma^2 + I)\omega_0^2 = \left(m\frac{a}{l} + M\right)gh = 2\left(m\frac{a}{l} + M\right)gl\sin^2\frac{\varphi}{2}. \quad 55^*$$

MERGEFORMAT ()

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

$$v = 2\sin\frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\sqrt{(ma^2 + I)\left(m\frac{a}{l} + M\right)gl}}{ma}. \quad 66^*$$

MERGEFORMAT ()

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

### Выполнение работы:

Масса цилиндра-уловителя  $m_1 = 91$  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 уловителя и стержня. Длину стержня  $l$  определяют как расстояние от точки подвеса до точки соединения уловителя и трубки.

#### 1. Определение момента инерции баллистического маятника.

Момент инерции физического маятника находят по периоду его качаний, равному

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mgl}}, \quad 77^*$$

MERGEFORMAT ()

(величины  $M$  и  $l$  нами уже определены!).

Обратите внимание, что для достаточно надежного измерения периода качаний мы должны обеспечить выполнение следующих условий:

- Амплитуда качаний должна быть достаточно мала, чтобы можно было пренебречь ее влиянием на период качаний;
- Нужно проследить за отсутствием качаний маятника по другой ортогональной оси (или дождаться их полного затухания, если они по каким-либо причинам возникли);

- Период качаний надо определить как среднее за 20—30 качаний, чтобы уменьшить погрешность измерения времени секундомером. Момент инерции вычисляется, исходя из (7), как

$$I = \frac{MglT^2}{4\pi^2} \quad 88 \setminus * \text{MERGEFORMAT} ()$$

Теоретическое значение момента инерции можно найти как сумму момента инерции стержня относительно оси вращения, перпендикулярной стержню и проходящей через один из его концов  $I_{cm} = \frac{1}{3}m_2a^2$  и момент инерции уловителя, который (в связи с достаточно большим расстоянием до оси вращения) можно принять за материальную точку, тогда  $I_{yn.} = m_1a^2$ , а теоретическое значение момента инерции баллистического маятника

$$I_{теор} = I_{cm.} + I_{yn.} = \frac{1}{3}m_2a^2 + m_1a^2. \quad 99 \setminus * \text{MERGEFORMAT} ()$$

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).

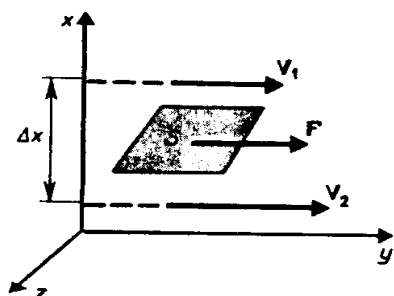
### Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом падающего шарика (метод Стокса)

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

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

#### 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 медленней, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила.



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:

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

(1)

где коэффициент пропорциональности  $\eta$ , зависящий от природы

жидкости, называется **динамической вязкостью** (или просто **вязкостью**).

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

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  $1,792 \cdot 10^{-2} \text{ П}$  до  $0,284 \cdot 10^{-2} \text{ П}$  (т.е. в 6,3 раза) при увеличении температуры от  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а у воздуха в этом же диапазоне вязкость увеличивается от  $1,709 \cdot 10^{-4} \text{ П}$  до  $2,175 \cdot 10^{-4} \text{ П}$ .

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:

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

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:

$$\text{Re} = \frac{\langle v \rangle d}{\nu}$$

(3)

При малых значениях числа Рейнольдса ( $\text{Re} < 1000$ ) наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области  $1000 < \text{Re} < 2000$ , а при  $\text{Re} = 2300$  (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**:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v \quad (4)$$

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)  $F_A = m_{ж} g = \frac{4}{3} \rho_{ж} \pi r^3 g$ ,  
где  $m_{ж}$  – масса вытесненной шаром жидкости;  $\rho_{ж}$  – 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:

$$mg + F_A + F_{тр} = 0 \quad (5)$$

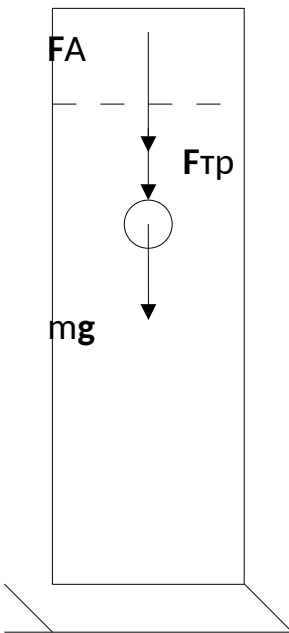


Рис.2.

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

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

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

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

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:

$T, ^\circ\text{C}$	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  $t_{\text{ср}}$ , за которое шарик проходит между двумя метками.
5. Измерить расстояние  $l$  между метками.
6. Вычислить скорость падения шариков  $v_0 = l/t_{\text{ср}}$ .
7. Подставить значение скорости в формулу (7), вычислить вязкость глицерина.
8. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_4, \text{с}$	$t_5, \text{с}$	$t_6, \text{с}$	$t_7, \text{с}$	$t_8, \text{с}$	$t_9, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$r, \text{м}$	$v_0, \text{м/с}$	$l, \text{м}$	$\eta, \text{П}$

*Примечание:* плотность свинца  $\rho = 11,350 \text{ г/см}^3$   
 плотность глицерина  $\rho_{\text{ж}} = 1,264 \text{ г/см}^3$ .

### Контрольные вопросы.

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

6. В каких единицах измеряют вязкость? От чего она зависит?

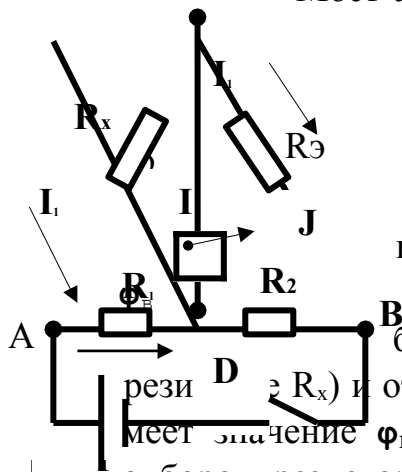
## Лабораторная работа № 4. Измерение сопротивления с помощью моста Уитстона.

**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.

### 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 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 (в точке  $B$ ). В цепи  $AEB$  пойдет ток  $I_1$  и



будет наблюдаться падение потенциала от  $\varphi_A$  до  $\varphi_E$  (на резисторе  $R_1$ ) и от  $\varphi_E$  до  $\varphi_B$  (на резисторе  $R_э$ ). Очевидно, потенциал в точке  $D$  имеет значение  $\varphi_D$  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:

$$\sum_{i=1}^h I_i R_i = \sum_{i=1}^m E_i \quad (2)$$

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

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

Из этих уравнений легко получаем соотношение (1).

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

Откуда:

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:

$$R_{\text{послед}} = R_{X1} + R_{X2} + R_{X3}; \quad \frac{1}{R_{\text{парал}}} = \frac{1}{R_{X1}} + \frac{1}{R_{X2}} + \frac{1}{R_{X3}}$$

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.

### I. Краткая теория.

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

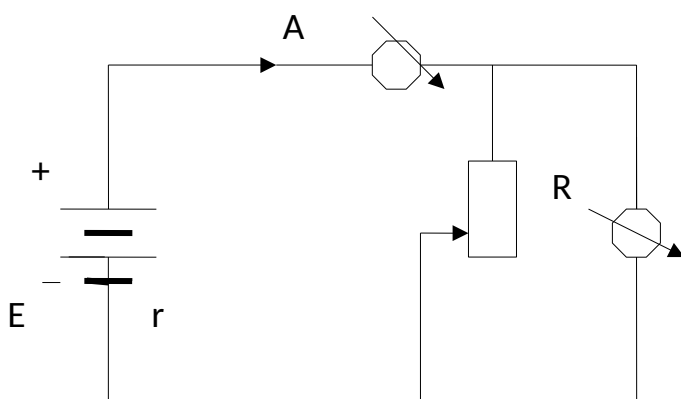


Рис.1

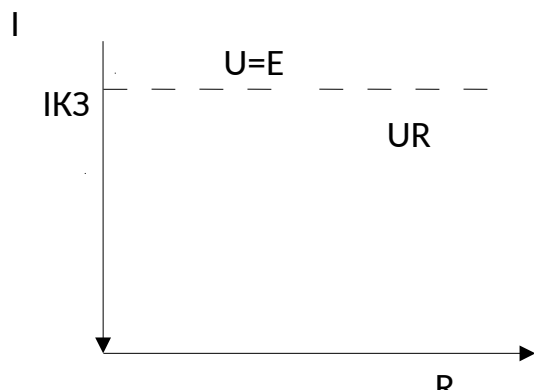


Рис.2.

На рис. 1 представлена простейшая цепь, состоящая из источника постоянного тока с ЭДС  $E$  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.

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

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

Из (1) легко получаем

$$E = IR + Ir = U_R + U_r, \quad (2)$$

где  $U_R = IR$  и  $U_r = Ir$  - 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  $R$ :

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

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

$$P = IE, \quad (4)$$

при этом мощность, выделяемая на нагрузке

$$P_R = IU_R, \quad (5)$$

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 ( $R=0$ )

$$P_{к.з} = I_{к.з} \cdot E = \frac{E^2}{r}, \quad (6)$$

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

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

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  $R \rightarrow \infty$ .

Найдем значение  $R_0$ , при котором полезная мощность, отбираемая от



источника, будет наибольшая. Для этого продифференцируем формулу (7) и приравняем производную нулю

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

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.  $U_{R_0} = \frac{E}{2}$ , а сила тока

– половине силы тока короткого замыкания  $I_{R_0} = \frac{I_{кз}}{2}$ .

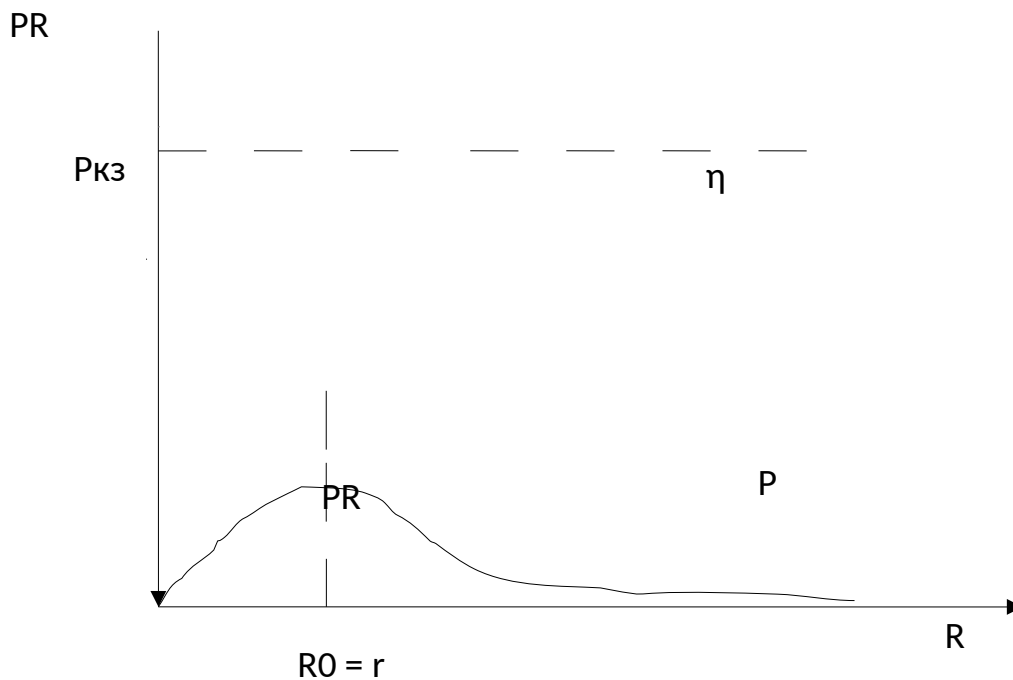


Рис.3

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.

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{IU_R}{IE} = \frac{U_R}{E} = \frac{R}{R+r} \quad (9)$$

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 могут использоваться аккумуляторы или выпрямитель, дающие 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.

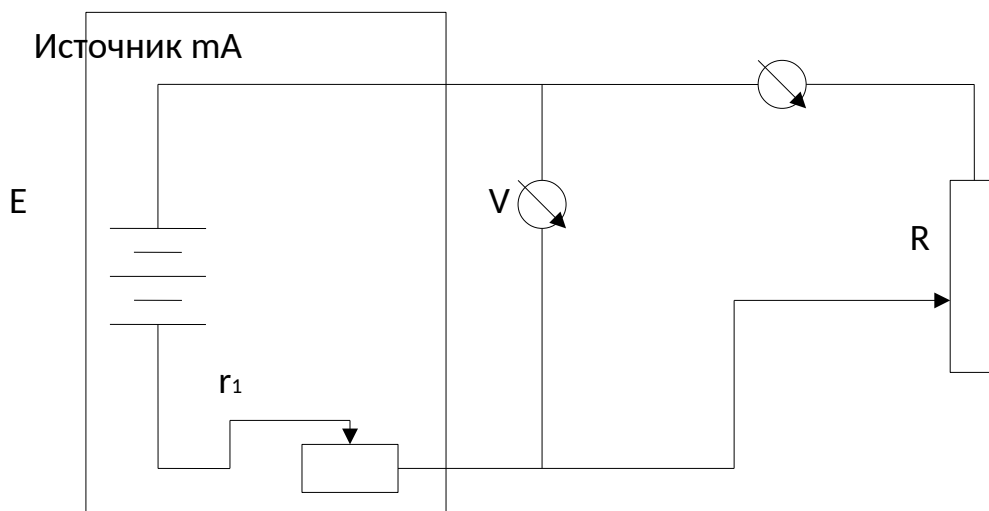


Рис. 4

## 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	$U_R$	$R = \frac{U_R}{I}$	$P = IE$	$P_R = IU_R$	$\eta = \frac{P_R}{P}$
	А	В	Ом	Вт	Вт	

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  $E$ . 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 № 5. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.

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

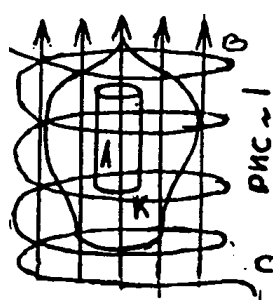
Принадлежности: магнетрон - электрическая лампа 2Ц2С (диод), расположенная внутри соленоида. Универсальный источник питания (УИП-2), выпрямитель Б5-7 с регулируемым напряжением, вольтметр, амперметр, миллиамперметр, реостат.

### 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 А и прямолинейным катодом К, расположенным на оси анода, помещенная в аксиальное (направленное



вдоль оси анода) магнитное поле с индукцией  $B$ , созданное достаточно длинным соленоидом С 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).

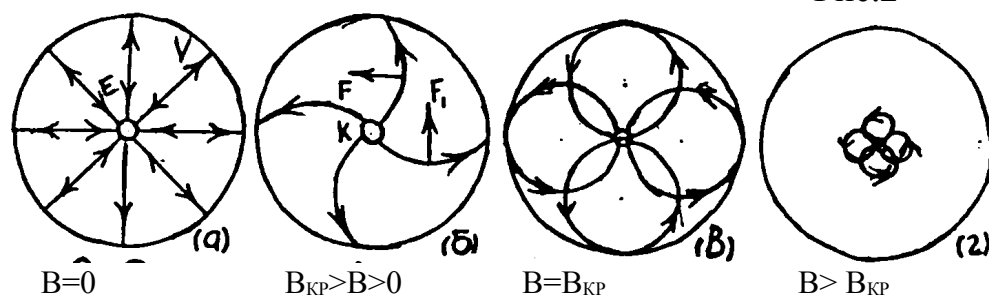


Рис.2

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  $Q=e=1,610^{-19}$  Кл. И выполняемая электрическим полем

работа  $A=eU_A$  идет на сообщение электрону кинетической энергии, равной  $mv^2/2$ .

Следовательно 
$$eU_A = \frac{mV^2}{2}$$
 Отсюда скорость  $V$  электрона достигшего анода будет равной

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

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 создастся однородное магнитное поле с индукцией

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

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

$$F = e|\vec{V} \cdot \vec{B}| \quad (3)$$

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

$$F = eVB, \quad (4)$$

а ее направление  $F$  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  $dA_\Lambda$  равна  $dA_\Lambda = Fdr \cos\alpha$ , где  $\alpha$ - угол между перемещением частицы  $dr$  и силы  $F$ . Из векторного произведения (3) следует, что  $F \perp V$ , следовательно  $F \perp dr$  (т.к.

$\vec{V} = \left( \frac{d\vec{r}}{dt} \right)$  и  $\cos\alpha=0$ . Значит, работа силы Лоренца  $dA_L$  равна нулю, т.е. в магнитном поле кинетическая энергия частицы  $\frac{mV^2}{2}$  остается неизменной и ее

скорость по величине постоянной ( $V=\text{const}$ ) 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

$$F = eVB = m\vec{V}^2 / r \quad (5)$$

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 ( $B=\text{const}$ ) траектория частицы - окружность ( $r=\text{const}$ ). При этом учтено, что  $V=\text{const}$ , 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)

$$r = (R_A - R_k) / 2 \quad (7)$$

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

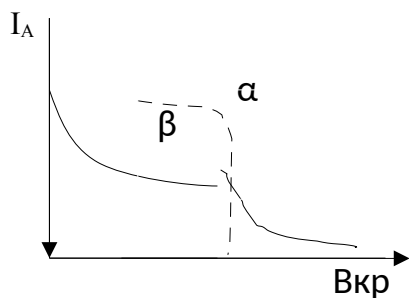


Рис. 3

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)

$$\frac{R_A - R_K}{2} = \frac{V}{\frac{e}{m} B_{кр}} = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_A} \frac{e}{m} B_{кр}$$

Откуда получим:

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

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

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

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

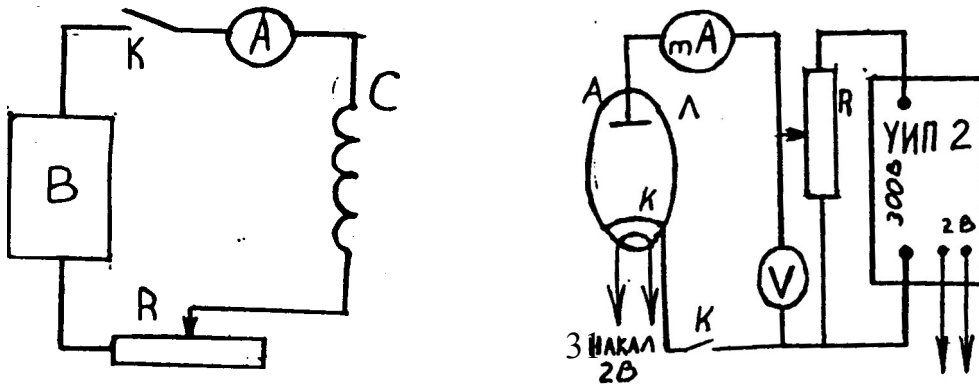
Через  $I_{кр}$  обозначено значение тока соленоида  $I_c$  соответствующее индукции  $B=B_{кр}$ . Коэффициент  $K$  зависит только от конструктивных данных магнетрона.

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.



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

Намагничивающийся соленоид  $C$  питается от выпрямителя  $B$  Б5-7. 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 УИП-2 и выпрямителя Б5-7 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  $R_K = 0,1\text{см}$  и анода  $R_A=0,95\text{см}$ . Измерить и записать длину соленоида  $l$ .

8. Рассчитать по формуле (8) величину коэффициента  $K$  и определить значение  $e/m$  для электрона.

9. Сравнить полученное значение  $e/m$  с табличным и выразить разницу в процентах.



### **Контрольные вопросы.**

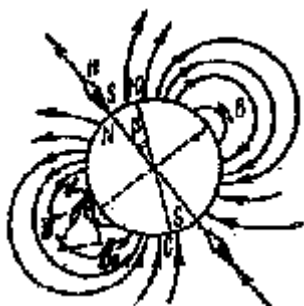
1. Что называется удельным зарядом частиц?
2. Как действует электрическое поле на заряженную частицу?
3. Как действует магнитное поле на находящуюся в нем частицу?
4. Каково устройство используемого в работе магнетрона?
5. Как движутся электроны в магнетроне?
6. Расскажите о критическом режиме работы магнетрона?
7. Какие идеализации вводятся при рассмотрении движения электронов в магнетроне?
8. Вывести рабочую формулу (8).

## Лабораторная работа № 6. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

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

### 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 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  $B_3$  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

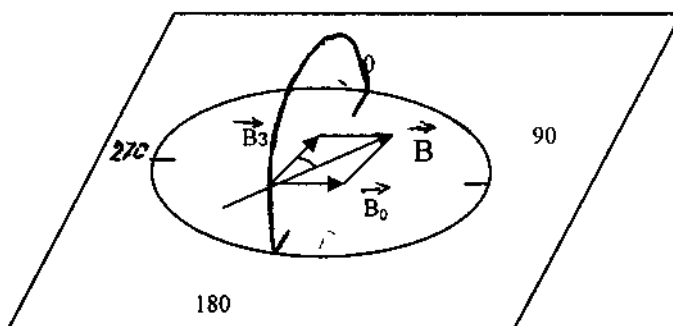


рис.2.

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 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  $B = B_0 + B_3$ , 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  $B_0 = \frac{\mu_0 I n}{2R}$ , то в

центре  $n$  витков очевидно  $B_0 = \frac{\mu_0 I n}{2R} \quad (2)$

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

Подставив (2) в (1) получим

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.

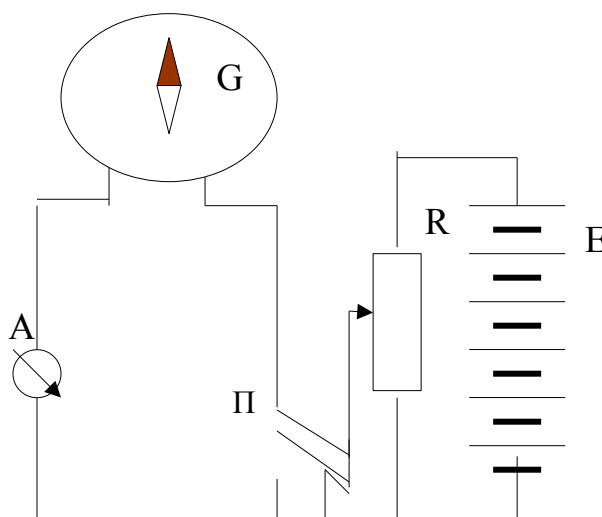


рис. 3

### 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 П направление тока на противоположное. Отсчитать новый угол отклонения стрелки  $\alpha_2$ .

Вычислить 
$$\alpha_{cp} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}$$
.

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

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. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.

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

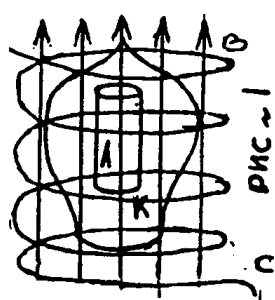
Принадлежности: магнетрон - электрическая лампа 2Ц2С (диод), расположенная внутри соленоида. Универсальный источник питания (УИП-2), выпрямитель Б5-7 с регулируемым напряжением, вольтметр, амперметр, миллиамперметр, реостат.

### 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 А и прямолинейным катодом К, расположенным на оси анода, помещенная в аксиальное (направленное



вдоль оси анода) магнитное поле с индукцией  $B$ , созданное достаточно длинным соленоидом С 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).

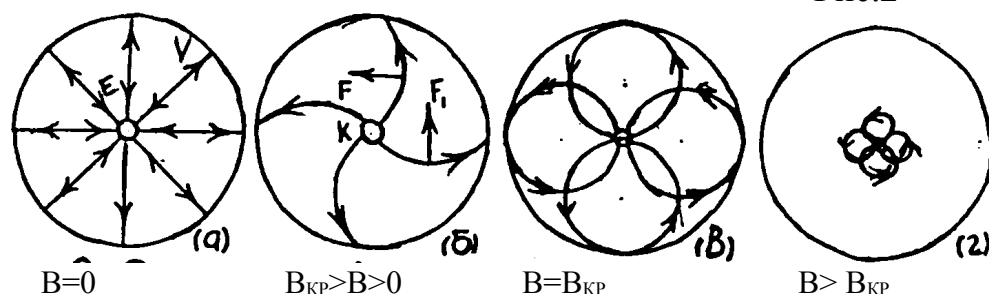


Рис.2

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  $Q=e=1,610^{-19}$  Кл. И выполняемая электрическим полем

работа  $A=eU_A$  идет на сообщение электрону кинетической энергии, равной  $mv^2/2$ .

Следовательно 
$$eU_A = \frac{mV^2}{2}$$
 Отсюда скорость  $V$  электрона достигшего анода будет равной

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

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

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

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

$$F = e|\vec{V} \cdot \vec{B}| \quad (3)$$

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

$$F = eVB, \quad (4)$$

а ее направление  $F$  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  $dA_{\Lambda}$  равна  $dA_{\Lambda} = Fdr \cos\alpha$ , где  $\alpha$ - угол между перемещением частицы  $dr$  и силы  $F$ . Из векторного произведения (3) следует, что  $F \perp V$ , следовательно  $F \perp dr$  (т.к.

$\bar{V} = \left( \frac{d\bar{r}}{dt} \right)$  и  $\cos\alpha=0$ . Значит, работа силы Лоренца  $dA_L$  равна нулю, т.е. в магнитном поле кинетическая энергия частицы  $\frac{mV^2}{2}$  остается неизменной и ее

скорость по величине постоянной ( $V=\text{const}$ ) 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

$$F = eVB = m\bar{V}^2 / r \quad (5)$$

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 ( $B=\text{const}$ ) траектория частицы - окружность ( $r=\text{const}$ ). При этом учтено, что  $V=\text{const}$ , 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)

$$r = (R_A - R_k) / 2 \quad (7)$$

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

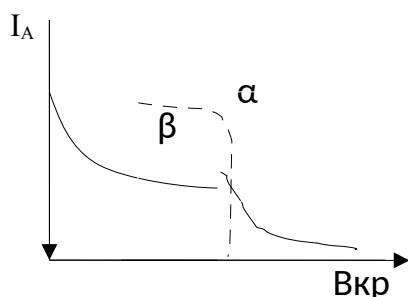


Рис. 3

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)

$$\frac{R_A - R_K}{2} = \frac{V}{\frac{e}{m} B_{кр}} = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_A} \frac{e}{m} B_{кр}$$

Откуда получим:

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

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

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

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

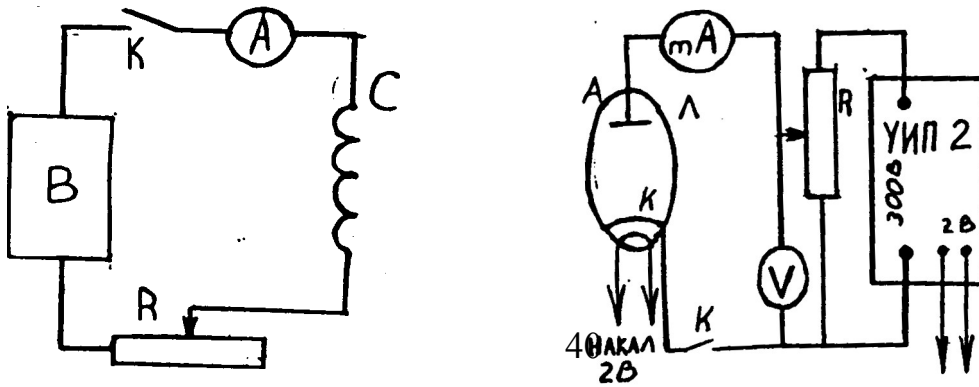
Через  $I_{кр}$  обозначено значение тока соленоида  $I_c$  соответствующее индукции  $B=B_{кр}$ . Коэффициент  $K$  зависит только от конструктивных данных магнетрона.

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.





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

Намагничивающийся соленоид  $C$  питается от выпрямителя  $B$  Б5-7. 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 УИП-2 и выпрямителя Б5-7 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  $R_K = 0,1\text{см}$  и анода  $R_A=0,95\text{см}$ . Измерить и записать длину соленоида  $l$ .

8. Рассчитать по формуле (8) величину коэффициента  $K$  и определить значение  $e/m$  для электрона.

9. Сравнить полученное значение  $e/m$  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 № 7. Проверка закона Малюса.

**Цель работы:** проверить закон Малюса.

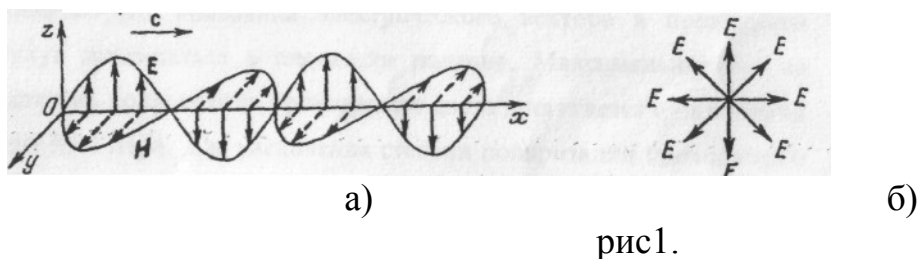
**Оборудование:** 1. Установка для проверки закона Малюса.

2. Источник света.

3. Микроамперметр.

### Краткая теория

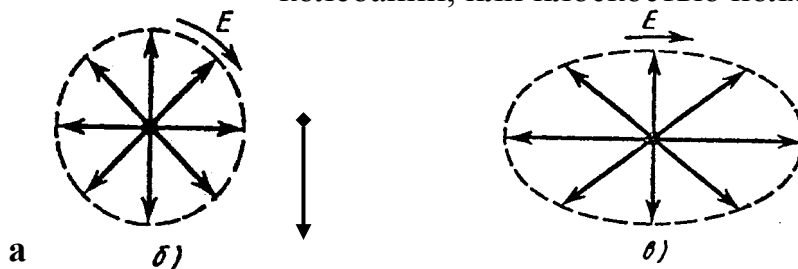
Как известно, плоская электромагнитная световая волна является поперечной и представляет распространение взаимно перпендикулярных колебаний: вектора напряженности электрического поля  $E$  и вектора напряженности магнитного поля  $H$  (рис.1а). Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое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



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

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  $E$  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  $E$ , называется плоскостью колебаний, или плоскостью поляризации волны.



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  $E$  перпендикулярным плоскости падения, а стрелочки - колебаниям в плоскости падения (Рис.3).

Степень поляризации отраженного луча зависит от относительного показателя преломления  $n_{12}$  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  $\text{tg} \alpha_B = n_{21}$  называется законом Брюстера. Плоскость колебаний электрического вектора в отраженном свете перпендикулярна плоскости падения.

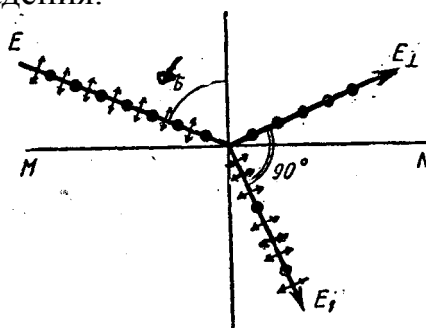


рис.3

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.

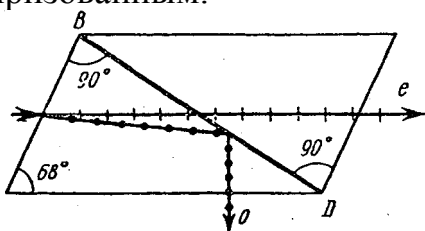


рис.4

#### 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.

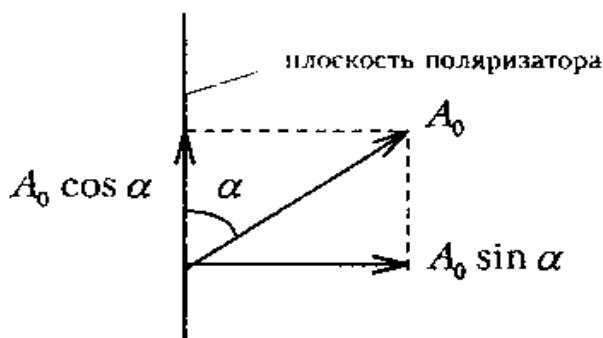
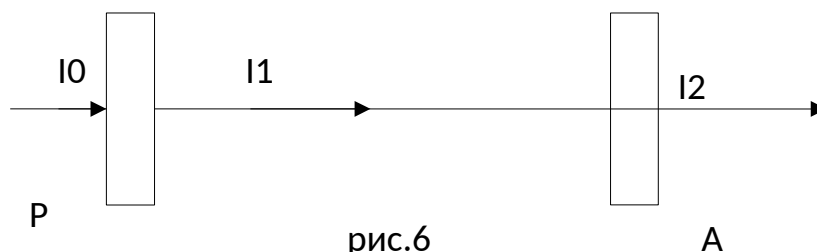


Рис. 5

Поставим на пути естественного луча поляризатор Р и анализатор А (рис.6). Из поляризатора выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого составит половину интенсивности естественного света, т.е.  $I_1 = I_0 / 2$ . 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  $I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$ .



### 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.

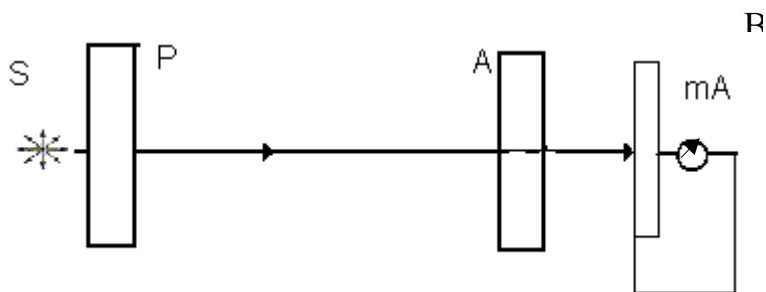


рис. 7

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 ВФ (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 (А 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)

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

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 № 8. Изучение зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры.

**Цель:** экспериментально проверить зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры.

**Оборудование:** полупроводники (термосопротивление), металл (медь), нагреватель, мультиметры.

Полупроводники - это вещества, у которых сопротивление электрическому току больше чем у металлов, но меньше чем у диэлектриков и существенно зависит от внешних воздействий - нагревания, облучения и т.д. Полупроводниками являются: кремний, германий, мышьяк, селен и другие элементы. Различие электрических свойств металлов, полупроводников и диэлектриков связаны с распределением электронов в атомах этих веществ.

Как известно, в изолированном атоме электроны движутся по строго определенным, разрешенным орбитам, то есть обладает определенными (дискретными) значениями энергии.

В кристалле электроны взаимодействуют не только со своим атомом, но и с соседними и у электронов, преимущественно валентных, появляется возможность перехода на соседние атомы, при этом незначительно изменяя свою энергию. Другими словами, в кристалле у электрона появляется ряд близко расположенных уровней разрешенной энергии, и его валентный уровень энергии превращается в зону уровня. Ширина зоны тем больше, чем сильнее взаимодействие между атомами и, следовательно, чем больше возможностей у электрона переходить от одного соседнего атома к другому.

Известно, что на одной орбите или в одном энергетическом состоянии не может быть более двух электронов и спины этих, электронов (собственные механические моменты) должны быть противоположно ориентированными. И так как зон и уровней бесконечно много, а число электронов в кристалле хоть и велико, но конечно, то электроны могут содержаться только на некоторых из них. При этом заполнение зон начинается с нижних разрешенных уровней. Энергетический спектр электронов в кристалле состоит из разрешенных и запрещенных зон. Наиболее высоко расположенная зона, еще содержащая электроны при абсолютном нуле температуры называется валентной зоной (так как ее уровни заполняют валентные электроны).

Следующая за валентной располагается зона разрешенных энергий, в которой не все уровни заняты электронами называется зоной проводимости. Зона проводимости отделена от валентной зоны энергетическим промежутком величиной  $\Delta E$ , называемым запрещенной зоной.

Ширина запрещенной зоны, а также характер заполнения валентной зоны, положены в зонной теории в основу деления кристаллов на проводники, диэлектрики и полупроводники.

К проводникам (металлам) относятся все кристаллы, с частично заполненной зоной проводимости (рис.1.а)



Если же при абсолютном нуле все уровни валентной зоны заняты электронами, то такой кристалл является либо диэлектриком, либо полупроводником (рис1.б). Между этими двумя веществами различие носит количественный характер в ширине запрещенной зоны  $\Delta E$ . Диэлектриками являются кристаллы с большой величиной  $\Delta E$  ( $\sim 3 \div 10$  Эв), а полупроводниками – с малой  $\Delta E$  ( $\sim 0,5 \div 3$  Эв). Электропроводность кристалла возможна только тогда, когда электрон за счет воздействия электрического поля приобретает энергию достаточную для перехода на более высокий энергетический уровень. Электропроводность осуществляется через частично заполненные зоны. Отсюда видно, что для металлов, с частично заполненной зоной проводимости вызвать движение электронов легко. Для этого нужна небольшая энергия, обеспечивающая электропроводность металлов при обычных температурах. Для полупроводников и диэлектриков для создания электропроводности электроны должны преодолевать запрещенную зону, что требует значительной энергии, особенно для диэлектриков. При абсолютном нуле температуры полупроводники ведут себя как обычные диэлектрики. Однако с повышением температуры, т.е. при  $T \neq 0$  в результате взаимодействия с колеблющимися ионами кристаллической решетки и другими электронами некоторые валентные электроны в полупроводнике могут получать энергию, достаточную для того чтобы стать свободными. Другими словами, эти электроны получают энергию

достаточную для преодоления сравнительно узкой для полупроводников запрещенной зоны и перейти в зону проводимости.

При таком переходе одного электрона одно состояние в зоне проводимости окажется занятым, а в валентной зоне возникнет одно незанятое состояние – "дырка". Поскольку в дальнейшем эта дырка может быть занята любым соседним валентным электроном и таким образом переместиться в другое место, то ее (дырку) следует рассматривать как подвижную частицу в валентной зоне с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона.

Появление свободных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне) при  $T \neq 0$  значительно изменяет проводимость полупроводников при их нагревании. Такая проводимость полупроводников называется собственной и она оказывается тем больше, чем больше электронов переброшено в зону проводимости, и, следовательно, чем больше дырок появилось в валентной зоне.

Очевидно, вероятность такого переброса очень сильно растет с температурой, поэтому растет и собственная проводимость полупроводников, а их сопротивление, соответственно падает.

Вероятность того, что при температуре  $T$  электрон получит энергию  $\Delta E$ , пропорциональна  $\exp[-\Delta E/kT]$ .

Учитывая, что электропроводность пропорциональна числу носителей заряда (электронов и дырок), можно представить, что проводимость  $\sigma$  и сопротивление  $R = 1/\sigma$  полупроводников зависят от температуры по экспоненциальному закону, т.е.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (1)$$

где  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана, а коэффициенты  $\sigma_0$  и  $R_0$  зависят от природы полупроводников и слабо изменяются с температурой.

Таким образом, полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления ( $R$  уменьшается с ростом  $T$ ), а одной из основных характеристик полупроводника является  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны.

Целью настоящей работы и является изучение температурной зависимости сопротивления полупроводников и определение энергии  $\Delta E$ .

Здесь же для сравнения определяется зависимость сопротивления металлического проводника от температуры. Как известно, у металлов  $R$  растет с температурой по линейному закону, т.е.

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

если  $t$  измеряется в градусах Цельсия. Или

$$R = R_0 \alpha T, \quad (2)$$

если  $T$  измеряется в градусах Кельвина.

## Выполнение работы.

1. Измерить зависимость  $R = f(T)$  для металлического проводника. Температура в нагревателе измеряется от  $20^\circ$  до  $100^\circ\text{C}$ . Результат занести в таблицу 1. Построить график зависимости  $R = f(T)$ .

2. Измерить зависимость  $R = f(T)$  для полупроводника. Температура в нагревателе измеряется от  $20^\circ$  до  $100^\circ\text{C}$ . По измеренным значениям  $R$  строят график зависимости  $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$ . Из уравнения (1), следует что  $\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT}$ ,

то есть если  $y = \ln R$ ,  $\ln R_0 = a$  а  $\frac{1}{T} = x$ , то график представляет собой прямую  $y = a + bx$

Тангенс угла наклона этой прямой  $b = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta E}{2k}$ .  
Отсюда

$$\Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (3)$$

Результаты измерений следует занести в табл. 1.

Табл. 1.

$t^\circ\text{C}$	20			
T(K)				
R(ом)				
$\frac{1}{T}$				
lnR				

По полученным данным строят график  $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , находят угловой коэффициент  $K_1 = \operatorname{tg}\varphi$  и определяют по формуле (3) величину  $\Delta E$  для данного полупроводника.

Следует оценить погрешность результатов.

## Контрольные вопросы.

1. Каким образом образуются зоны разрешенных и запрещенных значений энергии электрона?
2. Что такое "дырка" в полупроводнике?
3. Почему появляется цифра 2 в знаменателе показателя  $\exp$  в формуле (1)?
4. Расскажите о способе измерения ширины запрещенной зоны  $|\Delta E|$ .

## Лабораторная работа № 9. Исследование космического излучения.

**Цель работы:** исследование: 1) зависимости интенсивности космического излучения от выбранного направления; 2) проникающей способности космического излучения.

### 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.

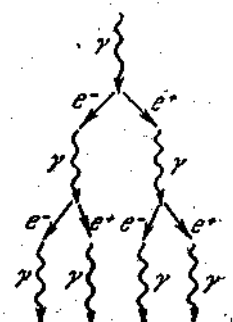


Рис.1

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 K-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, K-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

$$I = I_0 \cos^2 \phi$$

где  $I_0$  и  $I$  - интенсивности космического излучения в вертикальном направлении и под углом  $\phi$  к вертикали. Такая зависимость обусловлена поглощением космических лучей в воздухе атмосферы, толщина которого минимальна в вертикальном направлении и растет с увеличением угла  $\phi$ .

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:  $\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$

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:  $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$ ,  $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$

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  $\theta$ .

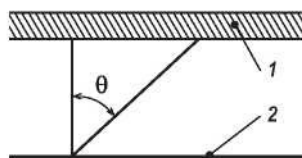


Рис.1. Генерация мезонов и путь их прохождения в атмосфере: 1 - слой генерации; 2 - уровень моря

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  $x$  (г/см<sup>2</sup>) 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 г/см<sup>2</sup>). 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

$$P_1(\theta) \sim (\cos\theta)^{1.6} \quad (1)$$

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  $L = v\tau$  - длина распадного пробега;  $v = \beta c$  - 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

$$\frac{N(\theta)}{N(0)} = \frac{P_1(\theta)}{P_1(0)} \frac{P_2(\theta)}{P_2(0)} = (\cos\theta)^{1,6} \frac{e^{-l(\theta)/L}}{e^{-l_0/L}} \quad (4)$$

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  $N(\theta)/N(0)$ , 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  $I_{Ж}$  компонент.

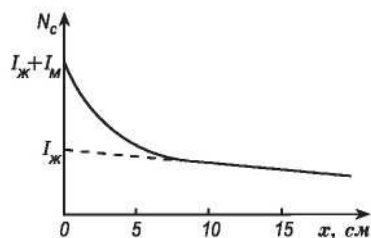
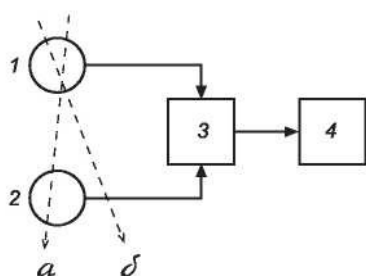


Рис.2. Блок-схема лабораторной установки для изучения космических лучей

Рис.3. Кривая поглощения фильтром космических лучей

Для этого прямолинейную часть, соответствующую жесткой компоненте, продолжают до пересечения с осью ординат. Это дает величину  $I_{Ж}$  (рис.3). Оставшаяся часть соответствует  $I_M$ . Для более точного определения  $I_{Ж}$  и  $I_M$  необходимо вычитать из общего числа совпадений число случайных совпадений.

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.

$\theta$	$N_{\mu\pi\pi}(\theta)$	$N_{\mu\pi\pi}(\theta) - N_{сл}$	$N_{\mu\pi\pi}(\theta) - N_{сл}$

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

$\frac{N_{\mu\pi\pi}(\theta) - N_{сл} - N_{л}}{N_{\mu\pi\pi}(0) - N_{сл}}$  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

$N(\theta)/N(0)$ , 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  $N_{изм}(\theta) - N_{ст} - N_{л}$  соответствующей функцией (см. формулы (3) - (5)). Как видно, в таком подходе не обязательно знать  $N_{изм}(0)$ , 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	$g$	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Молярный объем*	$V_m$	$22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная закона смещения Вина	$b$	$2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Дирака	$\hbar$	$1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Ридберга	$R$	$1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Первый борковский радиус	$a$	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Комптоновская длина волны	$\lambda$	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B$	$0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж (13,6 эВ)}$
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$

\*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	${}^9_5B$	9,01333
				${}^{10}_5B$	10,01294
				${}^{11}_5B$	11,00931
Водород	${}^1_1H$ ${}^2_1H$ ${}^3_1H$	1,00783 2,01410 3,01605	Углерод	${}^{10}_6C$	10,00168
				${}^{12}_6C$	12,00000
				${}^{13}_6C$ ${}^{14}_6C$	13,00335 14,00324
Гелий	${}^3_2He$ ${}^4_2H$	3,01603 4,0026	Азот	${}^{14}_7N$	14,00307
				Литий	${}^6_3L$ ${}^7_3Li$
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,
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	Температура кипения, °С	Удельная теплота
Вода	4,2	100	2,3
Ртуть	0,12	357	0,29
Спирт	2,4	78	0,85

### ГАЗЫ

Вещество	Удельная теплоемкость,	Температура конденсации, °С
Азот	1,0	-196
Водород	14	-252
Воздух	1,0	-
Кислород	0,92	-183

## Приложение 2. Справочные материалы по математике.

Корни квадратного уравнения  $ax^2 + bx + c = 0$ :

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Теорема Виета:

$$x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}, \quad x_1 x_2 = \frac{c}{a}.$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$$

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\sec^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha = 1$$

$$\operatorname{csc}^2 \alpha - \operatorname{ctg}^2 \alpha = 1$$

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1$$

$$\sin \alpha \cdot \operatorname{csc} \alpha = 1$$

$$\cos \alpha \cdot \sec \alpha = 1$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta}{1 \mp \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

$$\operatorname{ctg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta \mp 1}{\operatorname{ctg} \beta \pm \operatorname{ctg} \alpha}$$

$$\sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha$$

$$\cos 3\alpha = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$$

$$\sin \alpha = 1 / \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}$$

$$\cos \alpha = 1 / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\operatorname{tg} \alpha \mp \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}.$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$$

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

$$\cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$2 \sin \alpha \cdot \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$$

$$2 \cos \alpha \cdot \cos \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)$$

$$2 \sin \alpha \cdot \cos \beta = \sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)$$

## Свойства тригонометрических функций.

$$\begin{aligned}\sin(-x) &= -\sin x, \\ \cos(-x) &= \cos x, \\ \operatorname{tg}(-x) &= -\operatorname{tg} x, \\ \operatorname{ctg}(-x) &= -\operatorname{ctg} x,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin(x + 2\pi k) &= \sin x, \\ \cos(x + 2\pi k) &= \cos x, \\ \operatorname{tg}(x + 2\pi k) &= \operatorname{tg} x, \\ \operatorname{ctg}(x + 2\pi k) &= \operatorname{ctg} x,\end{aligned}$$

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:

$$a^2 - b^2 = (a - b)(a + b), \quad (a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2,$$

$$a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2), \quad (a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

### 1. Таблица производных

Функция	Производная	Функция	Производная
$1/x$	$-1/x^2$	$\sin x$	$\cos x$
$\sqrt{x}$	$1/(2\sqrt{x})$	$\cos x$	$-\sin x$
$x^n$	$nx^{n-1}$	$\operatorname{tg} x$	$1/\cos^2 x$
$e^{nx}$	$ne^{nx}$	$\operatorname{ctg} x$	$-1/\sin^2 x$
$a^x$	$a^x \ln a$	$\arcsin x$	$1/\sqrt{1-x^2}$
$\ln x$	$1/x$	$\arccos x$	$-1/\sqrt{1-x^2}$
$\frac{u(x)}{v(x)}$	$\frac{vu' - v'u}{v^2}$	$\operatorname{arctg} x$	$1/(1+x^2)$
$uv$	$uv' + v'u$	$\operatorname{arctg} x$	$-1/(1+x^2)$

### 2. Некоторые постоянные числа и приближенные формулы.

Постоянные числа	Приближенные формулы (при $\alpha \ll 1$ )
$\pi = 3,141$	$(1 \pm \alpha)^n \approx 1 \pm n\alpha$
$\pi^2 = 9,8696$	$e^\alpha \approx 1 + \alpha$
$\sqrt{\pi} = 1,772$	$\ln(1 + \alpha) \approx \alpha$
$e = 2,7183$	$\sin \alpha \approx \alpha$
$\lg e = 0,434$	$\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2/2$
$\ln 10 = 2,30$	$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$



### 3. 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 $
$\int \cos^2 x dx = \frac{1}{2}x + \frac{1}{4}\sin 2x$	$\int e^x dx = e^x$
$\int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$	$\int_0^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 2,405$
$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$	$\int u dv = u \cdot v - \int v du$
$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$	

#### 4. Некоторые сведения о векторах.

Скалярное произведение векторов:

$$a \cdot b = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

Векторное произведение векторов:

$$[\vec{a} \vec{b}] = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - a_z b_y) \vec{i} + (a_z b_x - a_x b_z) \vec{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \vec{k}$$

$$a [\vec{b} \vec{c}] = b [\vec{c} \vec{a}] = c [\vec{a} \vec{b}] \vec{a}$$

$$[a [\vec{b} \vec{c}]] = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a} + \vec{b}) = \frac{d\vec{a}}{dt} + \frac{d\vec{b}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\alpha \vec{a}) = \frac{d\alpha}{dt} \vec{a} + \alpha \frac{d\vec{a}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a} \vec{b}) = \frac{d\vec{a}}{dt} \vec{b} + \vec{a} \frac{d\vec{b}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}[\vec{a} \vec{b}] = \left[ \frac{d\vec{a}}{dt} \vec{b} \right] + \left[ \vec{a} \frac{d\vec{b}}{dt} \right]$$

**Рекомендуемая литература**

**Основная литература:**

1. Трофимова Т.И. Курс физики.— М.: Высшая школа, 2015 г.
2. Трофимова Т.И. , Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие для вузов – 4-е издание, - М., Высшая школа, 2015 г.
3. Чертов А.Г. Задачник по физике. – М., Высшая школа, 2014 г.

**Дополнительная литература:**

1. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2014 г.
2. Грабовский Р.И. Курс физики. – СПб, 2014 г.

**Интернет-ресурсы:**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://e.lanbook.com> - электронно-библиотечная система «ЛАНЬ»
3. <http://elibrary.ru/> - eLIBRARY.RU - НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ

БИБЛИОТЕКА