

# МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Горно-Алтайский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО ГАГУ, ГАГУ, Горно-Алтайский государственный университет)

## Основы физического эксперимента рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой **кафедра математики, физики и информатики**

Учебный план 03.03.02\_2023\_613.plx  
03.03.02 Физика  
Альтернативная энергетика

Квалификация **бакалавр**

Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **3 ЗЕТ**

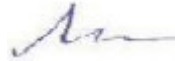
Часов по учебному плану	108	Виды контроля	в семестрах:
в том числе:		зачеты	1
аудиторные занятия	42		
самостоятельная работа	56,2		
часов на контроль	8,85		

### Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	1 (1.1)		Итого	
	16 5/6			
Неделя				
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	16	16	16	16
Лабораторные	26	26	26	26
Консультации (для студента)	0,8	0,8	0,8	0,8
Контроль самостоятельной работы при проведении аттестации	0,15	0,15	0,15	0,15
Итого ауд.	42	42	42	42
Контактная работа	42,95	42,95	42,95	42,95
Сам. работа	56,2	56,2	56,2	56,2
Часы на контроль	8,85	8,85	8,85	8,85
Итого	108	108	108	108

Программу составил(и):

*К.ф.-м.н, Профессор, Михайлов Сергей Петрович*



Рабочая программа дисциплины

**Основы физического эксперимента**

разработана в соответствии с ФГОС:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 03.03.02 Физика (приказ Минобрнауки России от 07.08.2020 г. № 891)

составлена на основании учебного плана:

03.03.02 Физика

утвержденного учёным советом вуза от 26.12.2022 протокол № 12.

Рабочая программа утверждена на заседании кафедры

**кафедра математики, физики и информатики**

Протокол от 09.03.2023 протокол № 8

И.о. зав. каф. Богданова Р.А.



---

---

**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2024-2025 учебном году на заседании кафедры **кафедра математики, физики и информатики**

Протокол от \_\_\_\_\_ 2024 г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой И.о. зав.каф. Богданова Р.А.

---

---

**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2025-2026 учебном году на заседании кафедры **кафедра математики, физики и информатики**

Протокол от \_\_\_\_\_ 2025 г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой И.о. зав.каф. Богданова Р.А.

---

---

**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2026-2027 учебном году на заседании кафедры **кафедра математики, физики и информатики**

Протокол от \_\_\_\_\_ 2026 г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой И.о. зав.каф. Богданова Р.А.

---

---

**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2027-2028 учебном году на заседании кафедры **кафедра математики, физики и информатики**

Протокол от \_\_\_\_\_ 2027 г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой И.о. зав.каф. Богданова Р.А.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	
1.1	<i>Цели:</i> Цель дисциплины – перед изучением курса общей физики обобщить и углубить школьные знания о некоторых приборах физической лаборатории и точности измерения физических величин; закрепить умение измерять некоторые физические величины.
1.2	<i>Задачи:</i> Задачи дисциплины: освежить в памяти и углубить основные понятия теории ошибок измерения, ознакомить с основными источниками питания и некоторыми измерительными приборами физической лаборатории; закрепить умение грамотно измерять некоторые физические величины, грамотно использовать физическую лексику и понятийный аппарат.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП	
Цикл (раздел) ООП:	Б1.О
<b>2.1</b>	<b>Требования к предварительной подготовке обучающегося:</b>
2.1.1	Математика
2.1.2	Математический анализ
2.1.3	Элементарная физика
<b>2.2</b>	<b>Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:</b>
2.2.1	Механика
2.2.2	Основы электротехники
2.2.3	Общая физика
2.2.4	Электричество и магнетизм
2.2.5	Молекулярная физика
2.2.6	Оптика
2.2.7	Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)	
<b>ОПК-2: Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;</b>	
<b>ИД-1.ОПК-2: Знает методику проведения физического эксперимента, способен проводить физические измерения и обрабатывать их результаты</b>	
Знает методику проведения физического эксперимента, способен проводить физические измерения и обрабатывать их результаты	
<b>ИД-4.ОПК-2: Способен представить экспериментальные данные в табличном, графическом виде или в виде функциональной зависимости</b>	
Способен представить экспериментальные данные в табличном, графическом виде или в виде функциональной зависимости	

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)							
Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетенции	Литература	Инте пакт.	Примечание
	<b>Раздел 1.</b>						
1.1	См. файл "Раб_прогр_осн_физ_экспер_2023.pdf" в приложении /Лек/	1	16	ИД-1.ОПК-2 ИД-4.ОПК-2	Л1.1Л2.1	0	

1.2	См. файл "Раб_прогр_осн_физ_экспер_2023.pdf" в приложении /Лаб/	1	26	ИД-1.ОПК- 2 ИД- 4.ОПК-2	Л1.1Л2.1	0	
-----	---	---	----	-------------------------------	----------	---	--

1.3	См. файл "Раб_прогр_осн_физ_экспер_2023.pdf" в приложении /Ср/	1	56,2	ИД-1.ОПК-2 ИД-4.ОПК-2	Л1.Л2.1	0	
<b>Раздел 2. Промежуточная аттестация (зачёт)</b>							
2.1	Подготовка к зачёту /Зачёт/	1	8,85	ИД-1.ОПК-2 ИД-4.ОПК-2		0	
2.2	Контактная работа /КСРАТг/	1	0,15	ИД-1.ОПК-2 ИД-4.ОПК-2		0	
<b>Раздел 3. Консультации</b>							
3.1	Консультация по дисциплине /Конс/	1	0,8	ИД-1.ОПК-2 ИД-4.ОПК-2		0	

## 5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

### 5.1. Пояснительная записка

1. Оценочные средства предназначены для контроля и оценки образовательных достижений обучающихся, освоивших программу учебной дисциплины.  
2. Фонд оценочных средств включает контрольные материалы для проведения текущего и промежуточного контроля в формах, указанных ниже.

### 5.2. Оценочные средства для текущего контроля

Оценочные средства для текущего контроля см. в приложении 1 (файл "ФОС осн\_физ\_экспер\_2023.pdf").

### 5.3. Темы письменных работ (эссе, рефераты, курсовые работы и др.)

В соответствии с положением ГАГУ см. файл "ФОС осн\_физ\_экспер\_2023.pdf" в приложении

### 5.4. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Оценочные средств для промежуточной аттестации см. в приложении 1 (файл "ФОС осн\_физ\_экспер\_2023.pdf").

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 6.1. Рекомендуемая литература

#### 6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Эл. адрес
Л1.1	Михайлов С.П., Рупасова Г.Б.	Основы физического эксперимента: учебно- методическое пособие	Горно-Алтайск: БИЦ ГАГУ, 2020	<a href="http://elib.gasu.ru/index.php?option=com_abook&amp;view=book&amp;id=4018:995&amp;catid=6:physics&amp;Itemid=164">http://elib.gasu.ru/index.php?option=com_abook&amp;view=book&amp;id=4018:995&amp;catid=6:physics&amp;Itemid=164</a>

#### 6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Эл. адрес
Л2.1	Михайлов С.П.	Электричество и магнетизм: учебное пособие для вузов	Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2008	

### 6.3.1 Перечень программного обеспечения

6.3.1.1	Adobe Reader
6.3.1.2	Firefox
6.3.1.3	Foxit Reader
6.3.1.4	MS Office
6.3.1.5	MS WINDOWS
6.3.1.6	Яндекс.Браузер
6.3.1.7	Moodle
6.3.1.8	Kaspersky Endpoint Security для бизнеса СТАНДАРТНЫЙ
6.3.1.9	LibreOffice
6.3.1.10	NVDA

<b>6.3.2 Перечень информационных справочных систем</b>	
6.3.2.1	Межвузовская электронная библиотека
6.3.2.2	Электронно-библиотечная система IPRbooks
6.3.2.3	База данных «Электронная библиотека Горно-Алтайского государственного университета»

<b>7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>	
	проблемная лекция
	ситуационное задание

<b>8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)</b>		
<b>Номер аудитории</b>	<b>Назначение</b>	<b>Основное оснащение</b>
211 Б1	Компьютерный класс. Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Помещение для самостоятельной работы	Рабочее место преподавателя. Посадочные места обучающихся (по количеству обучающихся), компьютеры с доступом к Интернет
112 Б1	Лаборатория электричества и магнетизма. Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации	Генераторы. Магазины сопротивлений. Осциллографы. Регулятор напряжения 3кВА 220/250В. Электромагнит. Модульно-учебный комплекс МУК-ЭМ1 "Электричество и магнетизм". Стенды: «В мире науки и техники», «Десятичные приставки», «Рабочая программа», «Система». Рабочее место преподавателя. Посадочные места обучающихся (по количеству обучающихся)
102 Б1	Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации	Ученическая доска, мультимедиапроектор, экран, компьютер. Рабочее место преподавателя, посадочные места обучающихся (по количеству обучающихся), кафедра

<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)</b>
См. файл "Раб_прогр_осн_физ_экспер_2022.pdf" в приложении

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Министерство образования и науки РФ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Горно-Алтайский государственный университет» (ГАГУ)**

**Физико-математический и инженерно-технологический институт (ФМИТИ)**

**Кафедра математики, физики и информатики**

**С.П. Михайлов**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
«Основы физического эксперимента»**

Уровень основной образовательной программы **бакалавриат**  
Для направления подготовки 03.03.02 «Физика»  
Профиль подготовки «Альтернативная энергетика»  
2023-2024 учебный год

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» (утвержден 7 августа 2020 г. № 891) и учебного плана по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» (профиль «Альтернативная энергетика»), утвержденного Ученым советом ГАГУ 27.01.2022 г., протокол № 1

Программа утверждена на заседании кафедры математики, физики и информатики 9 марта 2023 г. (протокол № 8)

Горно-Алтайск  
2023



## ВВЕДЕНИЕ

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования и рабочие учебные планы по направлению бакалавриата 03.03.02 «Физика» предусматривают, что областью профессиональной деятельности бакалавров по направлению подготовки "Физика" являются все виды наблюдающихся в природе физических явлений, процессов и структур. Сферой профессиональной деятельности выпускников являются:

государственные и частные научно-исследовательские и производственные организации, связанные с решением физических проблем;

учреждения системы высшего и среднего профессионального образования, среднего общего образования.

Объектами профессиональной деятельности бакалавров по направлению 03.03.02 «Физика» являются:

физические системы различного масштаба и уровней организации, процессы их функционирования, физические, инженерно-физические, физико-медицинские и природоохранные технологии, физическая экспертиза и мониторинг.

Бакалавр по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» готовится к следующим видам профессиональной деятельности:

научно-исследовательская;

научно-инновационная;

организационно-управленческая;

педагогическая и просветительская деятельность.

Поэтому в 1 семестре изучается дисциплина «Основы физического эксперимента».

### 1. Цели и задачи дисциплины.

**Цель дисциплины** – перед изучением курса общей физики обобщить и углубить школьные знания о некоторых приборах физической лаборатории и точности измерения физических величин; закрепить умение измерять некоторые физические величины.

**Задачи дисциплины:** освежить в памяти и углубить основные понятия теории ошибок измерения, ознакомиться с основными источниками питания и некоторыми измерительными приборами физической лаборатории; закрепить умение грамотно измерять некоторые физические величины, грамотно использовать физическую лексику и понятийный аппарат.

### 2. Место дисциплины в структуре ООП. Место и время проведения.

Дисциплина «Основы физического эксперимента» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1 (Б1.В.01) и проводится в первом семестре на базе физико-математического отделения ФМИТИ, заканчиваясь зачётом. При освоении учебного материала студенты используют знания, умения, навыки и способы деятельности, сформированные при изучении школьных предметов «Математика» и «Физика», а также изучаемых параллельно в 1-м семестре дисциплин «Математика» и «Элементарная физика». Освоенный материал является основой для изучения общей физики и в последующем дисциплин профессионального цикла.

### 3. Требования к результатам освоения дисциплины.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- знает методику проведения физического эксперимента, способен проводить физические измерения и обрабатывать их результаты (ИД-1, ОПК-2);
- способен представить экспериментальные данные в табличном, графическом виде или в виде функциональной зависимости (ИД-4, ОПК-2).

В результате изучения дисциплины студент должен

**знать:**

- основные понятия теории ошибок измерения, изучаемые физические понятия и законы;

**уметь:**

- использовать основные источники питания и некоторые измерительные приборы физической лаборатории;
- грамотно измерять некоторые механические и электрические физические величины, проводить измерения параметров электротехнических устройств;

**владеть:**

- навыками расчёта погрешностей измерения.

### 4. Объем и виды, особенности организации учебной работы.

Общая трудоемкость дисциплины составляет **3 зачетных единицы (108 часов)**. Из них аудиторных часов 42 часа (около 1,2 зачётных единицы), на самостоятельную работу студентов СРС и её контроль 66 часов (около 1,8 зачетных единицы). Аудиторные часы делятся так: 18 часов лекций и 24 часа лабораторных занятий. Часы самостоятельной работы используются на изучение материала лекций и подготовку к лабораторным работам, а также на восстановление пропущенных занятий, в том числе под руководством преподавателя (ИРС – индивидуальная работа преподавателя со студентами).

Фактически на все занятия отводятся 18 недель 1 семестра, в среднем по 6 учебных часов в неделю. В течение первых 9 недель вычитываются лекции; затем 5 недель идут лабораторные работы. По 4 часа самосто-

ательной работы используются в течение 16 недель на проработку материала лекций и подготовку к лабораторным работам. После окончания лабораторных работ выделяются 4 часа ИРС для студентов, не успевших выполнить работы. Наконец, в течение ещё недели в конце семестра выделяются 4 часа ИРС для студентов, имеющих задолженности по лекциям. Вот пример календарного плана на 2017-2018 учебный год, с которым студенты знакомятся на первой лекции.

ПРИМЕР КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА ДИСЦИПЛИНЫ на 2017-2018 учебный год

	Сентябрь				Октябрь				Ноябрь				Декабрь					
Неделя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Даты	1-2	4-9	11-16	18-23	25-30	2-7	9-14	16-21	23-28	30-4	6-11	13-18	20-25	27-2	4-9	11-16	18-23	25-30
Лек.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Л/р																		
СРС		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
ИРС																4	6	

Число часов: лекционных 18, лабораторных работ 24, СРС и ИРС - 66. Лекции читает проф. Михайлов Сергей Петрович. Лабораторные работы ведёт доцент Рупасова Галина Бахтияровна. Ст. лаборант лаборатории электромагнетизма – Каменева Галина Кузьмовна. Форма контроля - зачёт.

#### 4.1. Проведение лекций и лабораторных работ

Лекции идут обычно 1 раз в неделю. От студентов требуется не пропустить ни одной лекции; полностью записать материал, в том числе номер лекции и её дату; до начала лабораторных работ заучить важнейшие понятия (в тексте лекций выделяются подчёркиванием) и формулы (в отличие от необязательных формул, важнейшие обводятся в тексте лекций двойной рамкой). Если хотя бы половинка лекции была пропущена по любой причине, в том числе уважительной, нужно переписать пропущенный материал и подготовиться к собеседованию **по всему лекционному материалу** курса (вопросы к собеседованию см. в разделе 9). Такое собеседование будет проводиться в часы ИРС в конце семестра; если студент пропустил эти часы или не прошёл собеседование, то будет отчислен из вуза как не выполнивший учебный план.

Каждое занятие в лаборатории идёт 4 часа по подгруппам (если их две), которые определит преподаватель, ведущий лекции; лабораторные работы выполняются бригадами из 2-3 человек. Форма организации занятий – один цикл из 5 занятий, причём занятия проводятся в разных лабораториях. Разбивку по бригадам и порядок прохождения работ в цикле определит преподаватель, ведущий лабораторные работы. Тематика работ и отрабатываемые в каждой из них экспериментальные умения даны в разделе 5.

Для подготовки к работе в лаборатории следует изучить материал лекций и рекомендуемую литературу. При защите лабораторной работы нужно иметь оформленный отчёт. Ход и качество отработки экспериментальных умений контролируют лаборант и преподаватель. Усвоение теоретического материала проверяет преподаватель в ходе собеседования. Поскольку дисциплина идёт только у физиков, то число подгрупп в лаборатории максимум 2, но может набираться и меньше группы студентов. Кроме того, цикл идёт в течение 5 недель. Значит, в случае пропуска какой-то лабораторной работы выполнить её можно с другой подгруппой курса (если она есть) в течение этих недель. **А вот пропуск нескольких лабораторных работ совершенно недопустим**, т.к. организовать их отработку практически невозможно; лаборатории нужны для других курсов, и данные работы будут со столов убраны. Ждать год, пока работы не повторятся у следующего 1 курса, не позволит деканат; дело в том, что в течение 1 курса отчисленный студент восстановлению не подлежит и должен поступать в вуз снова на общих основаниях. Ежегодно несколько студентов, решивших, что в первом семестре можно и погулять, убеждаются в этом на своём печальном опыте: у них не зачитываются лабораторные работы и они отчисляются из вуза. Дело не меняется даже в случае пропуска занятий по вполне уважительным причинам, подтверждённым документами (болезнь; не ходили автобусы и т.п.) организовать заново выполнение 20, например, часов лабораторных работ нереально, поскольку преподаватель свои учебные часы в лаборатории уже провёл, и требовать их выполнения заново никто права не имеет.

#### 4.2. Порядок сдачи зачёта

Для допуска к зачёту нужно не иметь пропусков по всем видам занятий или отработать их (например, переписать лекции и успешно пройти собеседование по ним). Зачёт ставится по итогам выполнения и защиты лабораторных работ. **Предусмотрен, таким образом, зачёт-автомат для студентов, успешно выполнивших и сдавших все лабораторные работы и не имеющих задолженностей по лекциям.**

### 5. Содержание дисциплины

#### 5.1. Программа дисциплины.

Особенности вуза и факультета. Организация самостоятельной работы. Особенности физики как учебной дисциплины.

Физика как наука. Сравнение физики как науки с историей и математикой. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Взаимосвязь физики и техники. Физика и моделирование. Фи-

зические модели. Компьютеры в современной физике. Компьютерная модель. Экспериментальная, теоретическая и вычислительная физика.

Роль измерения в физике. Системы единиц. Основные единицы СИ. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.

Электроизмерительные приборы. Системы электроизмерительных приборов: принцип действия, устройство, особенности применения. Шунт и добавочное сопротивление: способы их расчёта. Многопредельные электроизмерительные приборы.

Источники переменного и постоянного тока: принцип действия, устройство, особенности применения. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.

Электронные приборы. Блок-схема электронного осциллографа, назначение блоков. Принцип действия осциллографа. Виды осциллографов. Цифровой осциллограф на базе ЭВМ.

## **5.2. Темы лабораторных работ, теоретические вопросы и отрабатываемые умения**

**Внимание! Работы с номерами 2а и 2 б выполняются в течение одного 4-часового занятия.**

**Работа № 1. Измерение объемов тел с помощью штангенциркуля и микрометра и обработка результатов измерений.**

### **Теоретические вопросы**

1. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей.
2. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.

### **Отрабатываемые экспериментальные умения**

1. Измерить линейную величину с помощью линейки, штангенциркуля и микрометра, измерительного микроскопа. Оценить погрешность измерения.
2. По результатам линейных замеров найти объём предложенного тела. Оценить погрешность измерения.

**Работа № 2а. Определение коэффициента вязкости (внутреннего трения) жидкости методом Стокса.**

### **Теоретические вопросы**

1. Вязкость жидкостей и газов. Коэффициент вязкости. Ламинарное и турбулентное течение. Число Рейнольдса. Формула Стокса.
2. Объяснить вывод формулы определения коэффициента вязкости.

### **Отрабатываемые экспериментальные умения**

1. Измерить коэффициент вязкости (внутреннего трения жидкости) методом Стокса. Оценить погрешность измерения.

**Работа № 2б. Определение размеров микроскопических (броуновских) частиц методом наблюдения их распределения в поле тяжести.**

### **Теоретические вопросы**

1. Распределение Больцмана.
2. Объяснить получение формулы для определения объёма микроскопических (броуновских) частиц.

### **Отрабатываемые экспериментальные умения**

1. Измерить размеры микроскопических частиц методом наблюдения и распределения в поле тяжести. Оценить погрешность измерения.

**Работа № 3. Электрические измерения.**

### **Теоретические вопросы**

1. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей.
2. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.
3. Электроизмерительные приборы. Системы электроизмерительных приборов: принцип действия, устройство, особенности применения.
4. Шунт и добавочное сопротивление: их расчёт. Многопредельные электроизмерительные приборы.
5. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.

### **Отрабатываемые экспериментальные и практические умения**

1. С помощью авометра определить напряжение на клеммах источника питания; определить сопротивление своего тела, взяв проводники авометра руками.
2. С помощью школьного демонстрационного гальванометра измерить напряжение источника питания; измерить ток через реостат, подключенный к этому источнику.
3. В собранной преподавателем или лаборантом электрической цепи объяснить назначение всех элементов, начертить схему этой цепи и добиться горения лампочки (в том числе найдя с помощью омметра место обрыва, устранив неверно включенные элементы и т.п.).

4. Через реостат подключить к источнику питания катушку с неизвестным сопротивлением и с помощью закона Ома рассчитать это сопротивление. Найти максимальную погрешность измерения. Результат проверить прибором ММВ.

#### **Работа № 4. Изучение электронного осциллографа.**

##### **Теоретические вопросы**

1. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.
2. Блок-схема электронного осциллографа, назначение блоков.
3. Принцип действия электронного осциллографа.

##### **Отрабатываемые экспериментальные и практические умения**

1. Проверить готовность электронного осциллографа к работе.
2. Используя в качестве источников переменного тока звуковой генератор и В-24 (или РНШ), получить на экране осциллографа фигуры Лиссажу для нескольких отношений частот.
3. Подать от генератора ГЗШ сигналы разной частоты (50, 200, 500 Гц) и амплитуды (выходы 5, 600 и 2000 Ом), получить на экране осциллографа устойчивое изображение одного периода синусоиды примерно одной амплитуды.
4. Продемонстрировать сигнал развёртки.

#### **Работа № 5. Источники тока.**

##### **Теоретические вопросы**

1. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей.
2. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.
3. Источники переменного и постоянного тока: принцип действия, устройство, особенности применения.
4. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.

#### **Работа № 6. Резервная.**

Выделена для студентов, по любой причине пропускавших лабораторные работы.

##### **Отрабатываемые экспериментальные и практические умения**

1. Найти на столах источник тока по его условному обозначению на схеме и объяснить назначение; для предложенного преподавателем источника тока нарисовать обозначение в схемах и объяснить назначение.
2. С помощью авометра определить наибольшие напряжения на всех клеммах источников тока В-24; ВС 4-12 и РНШ; ВУП; ГЗШ. Определить максимальную погрешность измерения.
3. Подключив к источнику постоянного тока реостат с известным сопротивлением, по двум измерениям тока нагрузки рассчитать ЭДС и внутреннее сопротивление источника. Взять такие источники: ВС 4-12 (допустим ток до 2 А); В-24 (допустим ток до 10 А); ВУП на выходе  $0 \pm 100$  В (допустим ток до 10 мА); щелочная аккумуляторная батарея (допустим ток 2-3 А). Оценить максимальную погрешность измерения.
4. Правильно выбирая пределы измерений и частоту развёртки, с помощью осциллографа ОЭШ получить и зарисовать в тетрадь устойчивое изображение сигналов на всех выходах следующих источников тока: В-24 и аккумуляторной батареи; ВС 4-12 и РНШ; ВУП, ГЗШ. Указать, какие из выходов постоянного напряжения выпрямителей являются одно- или двухполупериодными; какие дают фильтрованное напряжение.

#### **5.3. Примерная тематика лекций (9 лекций)**

1. Особенности вуза, факультета и специальности. Организация учебного процесса. Формы учебных занятий и самостоятельной работы; формы контроля. Особенности физики как учебной дисциплины.
2. Физика как наука. Сравнение физики как науки с историей и математикой. Методы физического исследования: наблюдение, опыт, эксперимент, гипотеза, теория. Взаимосвязь физики и техники. Физика и моделирование. Физические модели. Компьютеры в современной физике. Компьютерная модель. Экспериментальная, теоретическая и вычислительная физика.
3. Роль измерения в физике. Системы единиц. Основные единицы СИ. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов.
5. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений. Электроизмерительные приборы. Системы электроизмерительных приборов: принцип действия, устройство, особенности применения.
6. Шунт и добавочное сопротивление, их расчёт. Многопредельные электроизмерительные приборы. Источники переменного и постоянного тока: принцип действия, устройство, особенности применения.
7. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах. Электронные приборы.
8. Блок-схема электронного осциллографа, назначение блоков. Принцип действия осциллографа. Виды осциллографов.
9. Цифровой осциллограф на базе ЭВМ.

#### **5.4. Перечень важнейших понятий дисциплины (гlossарий).**

Физика. Методы физического исследования: наблюдение, опыт, эксперимент, гипотеза, теория. Компьютерная модель. Экспериментальная, теоретическая и вычислительная физика.

Измерение, его роль в физике и технике. Системы единиц. Основные единицы СИ. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Три вида и два типа погрешностей. Расчёт систематической погрешности прямых измерений; класс точности. Расчёт случайной погрешности прямых измерений; стандартное отклонение среднего, коэффициенты Стьюдента. Расчёт погрешности косвенных измерений.

Условные обозначения в электрических схемах и стандартные элементы электрических цепей. Электроизмерительные приборы; три системы. Включение и расчёт шунта и добавочного сопротивления. Схема включения и настройка омметра. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов.

Источники тока физической лаборатории; их характеристики. Устройство и принцип действия электронного и цифрового осциллографов; их характеристики.

#### 5.5. Матрица соответствия компетенций и видов занятий практики

Наименование вида занятий практики	Всего часов	Компетенции	Сумма компетенций
		ИД-1. ОПК-2, ИД-4. ОПК-2	
1. Лекции	18	+	2
2. Лабораторные работы	24	+	2
3. СРС, ИРС	66	+	2
Итого часов	108		

### 6. Рекомендуемая литература

#### 6.1. Основная рекомендуемая литература

1. Михайлов С.П., Петров А.В. и др. Элементарная физика, ч.1. Горно-Алтайск, РИО ГАГУ, 2009.
2. Михайлов С.П., Рупасова Г.Б. Основы физического эксперимента. Учебно-методическое пособие, Горно-Алтайск, РИО ГАГУ, 2020, 122 с.
3. Михайлов С.П. Элементарная физика, ч.3. Горно-Алтайск, РИО ГАГУ, 2010.

#### 6.2. Дополнительная литература

1. Михайлов С.П. Лабораторный практикум по курсу "Электричество и магнетизм". РИО ГАГУ, 2010 г.

#### Электронные ресурсы

1. Михайлов С.П. Рабочая программа основ физического эксперимента [Электронный ресурс] /С.П. Михайлов, 2021. - 80 с. Режим доступа:  
локальная сеть ФМФ, путь TEACHER\МИХАЙЛОВ\Раб\_пр\_основ\_физ\_эксп\_2021.pdf;  
система Moodle, Михайлов С.П., дисциплина «Основы физического эксперимента», раздел «Рабочая программа».

### 7. Материально-техническое обеспечение учебного процесса.

Используется типовая учебная аудитория на 1 группу с доской и мелом, фонды библиотеки и точки доступа в Интернет, а также оборудование трёх лабораторий общей физики: механики, молекулярной физики и термодинамики; электромагнетизма.

### 8. Образовательные технологии

1. Все лекции являются активными (проблемными): для каждой подобраны примеры применения изучаемых физических величин и формул, требующие участия студентов в диалоге с преподавателем и тренирующие отработку практических умений.
2. Во всех лабораторных работах выделены задания для исследования – все работы являются исследовательскими.
3. Во всех лабораторных работах выделены используемые теоретические знания, требующие подготовки к работе, и обрабатываемые экспериментально-практические умения; всё это приведено в рабочей программе.

### 9. Вопросы к собеседованию по пропущенным лекциям

Собеседование обязательно для студентов, по любой причине пропустивших хотя бы половину лекции. От них нужно:

- а) иметь переписанный текст пропущенных лекций;
- б) быть готовым ответить на один из 7 вопросов.
  1. Три вида и два типа погрешностей.
  2. Расчёт систематической и случайной погрешности прямых измерений.
  3. Расчёт погрешности косвенных измерений.
  4. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов.
  5. Условные обозначения в электрических схемах.
  6. Устройство и принцип действия электронного осциллографа.
  7. Что видно на экране осциллографа при отношении частот развёртки и синусоидального исследуемого сигнала 2:3, 3:2 и т.п.?

## 10. КУРС ЛЕКЦИЙ ДИСЦИПЛИНЫ «ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА»

### Лекция 1.

Основные темы. Назначение дисциплины. Особенности вуза, факультета, лектора. Организация учебной и самостоятельной работы.

### Назначение дисциплины.

Данные лекции читает сейчас профессор Михайлов С.П. и предназначены они студентам-физикам физмата, которым предстоит изучать курс общей физики.

Дисциплина «ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА» проходит в первом семестре, включая лекции и лабораторные работы. Главной её целью является обобщение и некоторое углубление школьного учебного материала по физическим измерениям.

### Особенности вуза, факультета, лектора.

В Горно-Алтайском государственном университете (ГАГУ) и на физико-математическом отделении (ФМО), входящем совместно с инженерно-технологическим отделением (ИТО) в физико-математический и инженерно-технологический институт (ФМИТИ) как часть ГАГУ, есть особенности, требующих учёта при организации учебного процесса.

Во-первых, наш университет находится в национальном образовании, и для части студентов русский язык является вторым. Кроме того, в отдельных сельских школах качество преподавания физики и математики не всегда на высоте. Отсюда повышенные требования к лекторам, особенно работающим на младших курсах: они должны не только умело отбирать материал, но и обеспечивать должный темп чтения лекций, иметь хорошую дикцию. Я, например, основной материал лекций буду просто диктовать и следить за тем, чтобы студенты в массе успевали всё записать. Каждая важная фраза поэтому будет повторена дважды в не очень высоком темпе. А вот если кто-то не успел, ему придётся оставить место и в дальнейшем переписать пропущенное у соседей: таким студентам я могу рекомендовать сокращать слова, писать быстрее, не отвлекаться и пр., но не просить повторить ещё раз!

Во-вторых, наш университет находится в национальном образовании, которому не нужно много научных работников в области физики. Наш вуз не так давно был педагогическим институтом и готовил только учителей, имел соответствующее оборудование, кадры и методику преподавания. Хотя университеты должны готовить в основном научных работников, юристов, экономистов и пр., ситуация после преобразования пединститута в университет существенно измениться не успела, по крайней мере на нашем факультете: изменился перечень дисциплин, открылись новые лаборатории, но остались кадры, отработанная методика, и, главное, потребность в подготовке педагогических кадров. Такие кадры нужно учить не только основам физики и математики, но и умению чётко говорить и писать, умело отбирать материал, обеспечивать правильный темп изложения и т.п. У педагога и научного работника разные задачи: первый должен учить известному, а второй добывать новые знания. Отсюда и разный подход: будущих педагогов во время обучения принято опекать и вести за руку, как они будут делать это в дальнейшем со своими учениками во время профессиональной деятельности. А вот будущий учёный должен быть гораздо более самостоятелен: ему придётся самому определять, каких знаний не хватает, искать эти недостающие знания и находить пути решения задачи (если она вообще решима). В классических университетах студентов вовсе не опекают; например, на моей памяти в Новосибирском госуниверситете из набора физиков в 100 человек выпускали 25, и это считалось нормой: остальные, предполагалось, оказались не способны к научной деятельности.

Наш факультет такого себе позволить не может: мы будем учить всех, кто учиться хочет и докажет это отношением к учёбе. Главный критерий у нас – усвоение знаний, приобретенных при изучении теоретического материала, и приобретение необходимых умений. Для этого, прежде всего, нельзя пропускать никаких видов занятий, регулярно готовиться к ним, вовремя выполнять контрольные работы и т.д. Действительно, в соответствии с уставом ГАГУ студент обязан посещать все виды занятий, и лишь начиная со второго курса получает право на особый, свободный порядок посещения лекций – един-

ственного вида занятий - по очень уважительной причине (рождение ребёнка, длительное стационарное лечение и т.п.). Оно оформляется на семестр решением декана с письменного согласия всех ведущих у студента лекторов (студент на заявлении о свободном посещении лекций собирает подписи всех лекторов). Поэтому я как лектор обязательно требую от старост составить в моём журнале списки студентов, и на каждой лекции обязательно фиксирую, все ли присутствуют, и какова причина отсутствия – уважительная (подтверждённая бумагами) или неизвестная.

Преподавателей, ведущих лабораторно-практические занятия, беспокоить не нужно – они не имеют права разрешить пропуск своих занятий по любой причине. Если человек на два месяца попал в больницу, то ему придётся оформлять академический отпуск и повторить обучение на этом курсе заново. На старших курсах люди могут уже где-то работать параллельно с учёбой; в любом случае пропуск лабораторно-практических занятий, семинаров, контрольных работ и др. по нашему уставу недопустим (см. также следующий раздел).

Кроме того, я резко отрицательно отношусь к студентам, опаздывающим на занятия; после звонка специально задерживаюсь перед аудиторией на 1-2 минуты, но затем каждый опаздывающий обязательно остановит лекцию для выяснения причин опоздания. Уважительных немного: задержал декан (обязательно проверю); подвернул ногу; в дороге сломалась личная автомашина, или, например, это первая лекция, а студент едет на автобусе откуда-то издалека (староста должен в моём журнале сделать у таких студентов пометки типа «Майма» или «Кызыл-Озёк»). При неуважительной («был в столовой или библиотеке», «не слышал звонок» и т.п.) студент в первый раз будет допущен, но в журнале сделаю пометку. При повторном опоздании без уважительной причины студента вполне могу на лекцию не пустить; прерывать лекцию имеет право только администрация (ректор, проректор, декан, зам. декана) и экстренные обстоятельства (приступ болезни, пожар и т.п.).

Староста группы обязан на каждой лекции подавать мне для подписи свой журнал учёта и делать в мой журнал пометки отсутствующим. Кроме того, староста группы отвечает за подготовку аудитории (мел, влажная тряпка, чистая доска).

### **Организация учебной и самостоятельной работы.**

В 2020-2021 учебных годах всего учебных часов дисциплины 36, из них лекций 16 и лабораторных работ 20 часов на студента, а также 72 часа самостоятельной работы. Предусмотрено 8 часов ИРС – индивидуальной работы преподавателей со студентами, пропущившими занятия. Итоговый контроль в виде зачёта, формы текущего контроля указаны выше.

Фактически на все аудиторские занятия отводятся первые 14-15 недель 1-го семестра. В течение первых 8 недель вычитываются лекции; затем 5 недель идут лабораторные работы. В течение ещё недели выделяются 4 часа ИРС для студентов, имеющих задолженность по лабораторным работам. Наконец, в конце семестра отводится 4 часов ИРС для студентов, имеющих задолженности по лекциям.

Лекции идут раз в неделю. От студентов требуется не пропустить ни одной лекции; полностью записать материал, в том числе номер лекции и её дату; до начала лабораторных работ заучить важнейшие понятия (в тексте лекций выделяются подчёркиванием) и формулы (в отличие от необязательных формул, важнейшие в тексте лекций выделяются, например, двойной рамкой). Если хотя бы половинка лекции была пропущена по любой причине, в том числе уважительной, нужно переписать пропущенный материал и подготовиться к собеседованию **по всему лекционному материалу** курса (вопросы см. в конце раздела 2). Такое собеседование будет проводиться в часы ИРС в конце семестра; если студент пропустил эти встречи или не прошёл собеседование, то будет отчислен из вуза, т.к. не выполнил учебный план.

Каждое занятие в лаборатории идёт 4 часа по подгруппам, которые определит преподаватель, ведущий лекции; лабораторные работы выполняются бригадами из 1-2 человек.

Форма организации занятий – цикл из 5 лабораторных работ, выполняемых друг за другом, причём занятия проводятся в разных лабораториях. Разбивку по бригадам и порядок прохождения работ в цикле определит преподаватель, ведущий лабораторные работы. Тематика работ, рассматриваемые теоретические вопросы и отрабатываемые экспериментальные умения см. выше, а описания работ – см. ниже.

Для подготовки к работе в лаборатории достаточно изучить материал лекций и описание выполняемой работы. При защите лабораторной работы нужно иметь оформленный отчёт. Ход и качество отработки экспериментальных умений контролируют лаборант и преподаватель. Усвоение теоретического материала проверяет преподаватель в ходе собеседования с подгруппой или данной бригадой. Дисциплина идёт только у физиков, т.е. число подгрупп в лаборатории максимум 2, а может быть и одна, если набор меньше 13 человек. Кроме того, цикл идёт в течение 5 недель. Значит, в случае пропуска какой-то лабораторной работы выполнить её можно только с другой подгруппой (если она есть) или в запасные часы в конце семестра. **А вот пропуск нескольких лабораторных работ совершенно недопустим**, т.к. организовать их отработку практически невозможно; лаборатории нужны для других курсов, и данные работы будут со столов убраны. Ждать год, пока работы не повторятся у следующего 1 курса, не позволит деканат: **в течение 1 курса отчисленный студент восстановлению не подлежит** и должен поступать в вуз снова на общих основаниях. Ежегодно студенты, решившие, что в первом семестре можно и погулять, убеждаются в этом на своём печальном опыте: у них не зачитывается, например, данная дисциплина и они отчисляются из вуза. Дела не меняет даже пропуск занятий по вполне уважительным причинам, подтверждённым документами (болезнь; не ходили автобусы и т.п.): организовать заново выполнение 20 часов лабораторных работ нереально, поскольку и работ на столах уже нет, и преподаватель свои часы выполнил, а требовать у него их выполнения заново никто права не имеет. Студент возмущается «Но я же болел!»; в таких случаях я говорю, что диплом вуза или медаль за это не дают.

Для допуска к зачёту нужно не иметь пропусков по всем видам занятий или отработать их (например, переписать лекции и успешно пройти собеседование по ним). Зачёт ставится по итогам выполнения и защиты лабораторных работ. **Предусмотрен, таким образом, зачёт-автомат для студентов, успешно выполнивших и сдавших все лабораторные работы и не имеющих задолженностей по лекциям.**

## Лекция 2.

**Основные темы.** Наука. Сравнение физики с историей и математикой Особенности физики как науки; экспериментальная, теоретическая и вычислительная физика. Взаимосвязь физики и техники.

### Наука. Сравнение физики с историей и математикой

**Наука** – способ изучения человечеством окружающего мира с целью своего выживания и успешного развития и реализующая эту цель структура. В структуру входят учебные и научные заведения, а также обеспечивающие их работу заводы, производства, службы и т.д. Поскольку мир очень сложен, а изучение идёт уже тысячи лет, то науки давно разделились, и основам некоторых, наиболее важных, учат в школе. Современному человеку приходится выбирать, какая область накопленных знаний ему ближе, и специализироваться в ней, изучая глубже. Начинать выбор приходится в школе (10-11 лет), затем высшее учебное заведение, где бакалавр 4 года изучает основы выбранной науки, а затем 2 года магистратуры специализируется, при желании, в каком-то узком её направлении. Есть и направления с 5-летней подготовкой, выпускающие дипломированных специалистов. Но научным работником с дипломом кандидата наук можно стать только после публичной защиты диссертации, где излагается, что нового внесено в данную науку. Чаще всего для подготовки диссертации нужно поступить в аспирантуру на 3-5 лет; поступать имеют право только магистры и специалисты, но не бакалавры. Таким образом, для получения новых научных результатов человеку приходится обычно готовиться от 15 до 22 лет. Люди с большими научными достижениями могут получить учёную степень доктора наук, на



что выделяется ещё 3 года докторантуры. Доктора наук за выдающиеся научные достижения могут быть пожизненно избраны членами-корреспондентами и действительными членами Академии наук РФ, получая право на государственную выплату за звание аналогично пенсионерам.

Сравним подходы к изучению мира трёх наук: математики, истории и физики. Чуть упрощая, можно сказать, что любая наука лежит на трёх китах: предмете исследования; наборе методов исследования (методологии); понятии истины.

Предметом исследования математики являются, по Ф. Энгельсу, пространственные формы и количественные отношения нашего мира. Действительно, геометрия и арифметика – древнейшие разделы математики, которым тысячи лет; с тех пор, правда, много чего напридумывали.

Методология включает выдвижение некоторых постулатов и аксиом, например, постулатов Евклида, из которых путём строгих логических заключений получаются какие-то следствия; сами эти постулаты недоказуемы и принимаются на веру. Особенность математики, значительно затрудняющая изучение (у педагогов есть даже термин «не математический склад ума») – её абстрактность, сильнейшая оторванность от реального мира. Так, в математике точка не имеет размеров, т.е. даже в линии конечной длины число точек бесконечно велико; линии разной длины при этом не имеют толщины, но содержат разные бесконечности числа точек, и математика начинает всё это подробно изучать - вводит понятие мощности бесконечного множества и пр. Разумеется, оторванность математики от реального мира сильнейшая, но не полная, иначе полученные следствия нельзя было бы применять на практике. Как оказалось, только достаточно сильно отстранившись от реальных предметов, можно обнаружить их наиболее общие свойства; кроме того, именно абстрактность делает математику единственной точной наукой. Так, площадь квадрата здесь точно равна квадрату длины стороны, поскольку не нужно учитывать толщину линий, ограничивающих этот квадрат. Физику, например (подробнее см. ниже) я к точным наукам отнести не рискую, поскольку все законы физики выполняются примерно, с какой-то точностью; для того же квадрата физик просто обязан спросить «А какой толщины линии используются в реальности?».

Критерий истины в математике также своеобразен: раз исходные положения недоказуемы в принципе, то проверить можно лишь строгость твоих логических заключений, чем и занимаются коллеги-математики. Если ошибок им обнаружить не удалось (это вовсе не значит, что их действительно нет - твою статью мог никто не прочитать, прочитать невнимательно, не заметить ошибки и пр.), полученное следствие признаётся истинным. Какое отношение результат имеет к реальному миру, никого при этом не интересует. Математики заявляют: всё, что может представить человеческий мозг, существует в реальности, и основания для таких утверждений есть. Вспомните, сколько издевались современники над Лобачевским, в пространстве которого сумма углов треугольника меньше  $180^\circ$ , и над Риманом, у которого эта сумма больше  $180^\circ$ . Между тем, достаточно было взять глобус и построить на нём треугольник, одна вершина которого лежит на полюсе, а ещё две на экваторе на расстоянии в четверть длины экватора. Легко увидеть, что все 3 угла будут прямыми, т.е. сумма углов -  $270^\circ$ . Причина понятна: построение ведётся на выпуклой поверхности шара. Но это реальная задача геодезии! Гораздо позже Эйнштейн доказал, что вблизи массивных тел пространство нашего мира не плоское, как у Евклида, а искривлённое по Риману. У Лобачевского поверхность, наоборот, вогнута, как на кавалерийском седле, и аналогов в реальности пока не найдено. Но уже давно к абстракциям математики культурная часть человечества относится серьёзно: да, пока неясно, где и как это можно применить на практике, но смеяться не стоит – глядишь, вновь в итоге получится что-то очень ценное. Казалось бы, кому нужна очень неудобная для человека двоичная система счисления, где привычное десятичное число 255 имеет вид 11111111. Ан нет, только с помощью двоичной системы удалось создать ЭВМ, на базе которых появились ПК, перевернувшие всю жизнь человечества в конце 20 века.

История изучает те события в жизни человечества, которые оставили вещественные свидетельства в виде документов, книг, фотоснимков, кинофильмов, звукозаписей и пр. Если о событии остались только устные свидетельства – былины, баллады, сказания - то история ими, как правило, не занимается. Методология истории включает, таким образом, максимально полный сбор исторических свидетельств о каких-то событиях и максимально объективную их оценку. Цель всё та же, практическая – разобраться в событиях прошлого, чтобы на базе их оценки принять правильные решения в будущем. Кому, например, должны принадлежать Курильские острова, России или Японии – вопрос сейчас остро актуальный. Критерий истинности - мнение коллег-специалистов, что сведения достаточно полны, а оценка достаточно объективна; мнение дилетантов с улицы никого при этом не интересует, хотя дилетанты здесь вполне могут, в отличие от математики, иметь собственное отличающееся мнение.

Сразу возникают вопросы: а что такое достаточно полный набор исторических свидетельств и достаточно объективная их оценка? Насколько полученные автором выводы независимы от мнения властей предрешающих? Разумеется, есть критерии отбора свидетельств и даже специальная область исторической науки – источниковедение. На практике же не раз бывало, что ещё один найденный документ переворачивал всю оценку ситуации с ног на голову. Ещё сложнее с объективностью оценки: классики марксизма не зря заявляли, что если бы математические аксиомы больно задевали жизненные интересы людей, они бы опровергались. Достаточно вспомнить, сколько раз на моей памяти менялась историческая оценка событий в России, например, до и после Октябрьской революции 1917 года.

**Особенности физики как науки; экспериментальная, теоретическая и вычислительная физика.**

**ФИЗИКА**, как известно из школьного курса - одна из старейших наук, изучающая наиболее простые и поэтому наиболее общие явления природы (слово “физика” и происходит от греческого слова “природа”). Если использовать философские понятия **материи**, как существующей независимо от нашего сознания и данной нам лишь в ощущениях объективной реальности, и **движения**, понимаемого как любое изменение, то **ФИЗИКА** изучает наиболее простые и поэтому наиболее общие формы движения материи (механическую, тепловую, электрическую и пр.) и взаимные их превращения. Широко известно и определение А.Ф. Иоффе: “Физика - это наука, изучающая общие свойства и законы движения вещества и поля”, где выделяются две существенно отличные формы материи - вещество и поле. В последнее время, однако, всё больше подтверждений находит точка зрения, что на уровне микромира вещество и поле неразличимы, т.е. и в макромире, который воспринимают органы чувств человека, разделять их особого смысла нет.

Есть и более сложные формы движения материи – биологическая, социальная и пр. Например, механика может рассчитать траектории планет на десятки лет вперёд, а вот предсказать, где будет кошка через 10 минут, в общем случае не удастся – поведение живых объектов не сводится только к физическим процессам. Ещё сложнее описать поведение единственного человека, а уж миллионов людей... Отсюда все проблемы общественных наук, в том числе истории. Тем не менее, какие-то закономерности и здесь найдены. Другое дело, что социология или политология как науки молоды, а предмет исследования – общество - не только крайне сложен, но и постоянно меняется.

Методология физики, как и любой науки, постоянно развивается. Долгое время единственным методом физического исследования были наблюдения (они и сейчас не потеряли значения, например, в астрофизике). Затем к ним добавились целенаправленные опыты (эксперименты) с помощью всё более точных и сложных приборов - сформировалась **экспериментальная физика**, использующая ныне рекордно дорогое оборудование (километровые ускорители и радиотелескопы, ядерные реакторы, космические аппараты, сверхмощные прессы и пр.).

После математической записи первых экспериментально установленных закономерностей

стей выделилась **теоретическая физика**, помогающая обработать, объяснить и сформулировать результаты опытов. Последовательность здесь такова. На базе каких-то наблюдений и опытов теоретики сначала выдвигают **гипотезы** – обоснованные предположения о сути этих опытов. Если гипотезы подтверждаются последующими опытами и охватывают достаточно широкий круг явлений, то они получают статус **физической теории**. После её создания удаётся предсказать новые явления и законы, а также осмысленно применить знания для целей практики (о функциях теории см. также ниже). Путь от частных опытов к их обобщению и к применению на практике есть путь любого научного познания. Изредка в основе теории, помимо опытов, лежат постулаты, но, в отличие от математики, выводы теории всё равно сверяются с опытом. В этом важнейшее, непримиримое отличие любой науки от любой религии: наука требует «Докажи», а религия «Веруй».

Покажем, что бесконечно малый объём, единственно верный в математике, в теоретической физике применять нельзя. Плотность  $\rho$  однородного вещества, как известно, определяется делением массы  $m$  какого-то объёма вещества  $V$  на величину этого объёма:  $\rho = m/V$ . Полученное число, как и **любая дробь**, показывает, **какая доля числителя приходится на единичную долю знаменателя**. Действительно разделив по справедливости, как и положено, 15 яблочек на троих, мы получим по 5 яблочек на **одного** человека. Значит, плотность показывает, какова масса единицы объёма этого вещества; 1 кубометр воды, как известно, имеет массу 1000 кг, стали – около 7800 кг, а воздуха – 1,2 кг.

Для неоднородных веществ плотность в разных точках разная, поэтому приходится брать достаточно малый (**физически малый**) объём  $\Delta V$ , в пределах которого плотность заметно измениться не успеет, вещество можно считать однородным и найти его плотность именно в пределах этого малого объёма. В соседнем объёме плотность, возможно, уже чуть другая, и точность вычисления плотности, казалось бы, тем выше, чем меньший объём брать. Математика так и поступает, выбирая всегда бесконечно малый, точный объём  $dV$ . **Важнейший значок "d"** здесь как раз и есть **признак бесконечной малости** величины, стоящей после этого значка; нужно не забывать, однако, что у значка есть "d" и второй смысл **бесконечно малого приращения величины**. В этом случае его зовут **дифференциалом**; применение дифференциала рассмотрено ниже. Напомним, что понятие дифференциала ввёл физик **Ньютон** (выделено ударение) независимо от математика **Лейбница**, и что только открытие интегрального и дифференциального исчисления позволило **Ньютону** записать законы механики.

Масса точечного объёма, естественно, тоже бесконечно мала, и обозначается  $dm$ . Тогда плотность  $\rho = dm/dV$  вполне может получиться конечной, поскольку мы одно бесконечно малое число поделили на другое бесконечно малое; математики говорят о «неопределённой дроби типа ноль делить на ноль». Для примера поделите два хотя бы **достаточно малых** (не бесконечно малых) числа: сначала поделите  $10^{22}$  на  $10^{38}$ , а затем наоборот. В первом случае деление даст большое число  $10^{16}$ , а во втором – малое число  $10^{-16}$ .

Главное, почему физика не может использовать бесконечно малый, точный объём  $dV$  – **зернистость вещества на атомно-молекулярном и особенно внутриатомном уровне**. Если от слитка стали отделить в каком-то месте достаточно малую для большинства практических целей крупинку объёмом  $\Delta V = 1 \text{ мм}^3$ , то масса её  $\Delta m$  будет где-то около 8 г; и плотность получится около  $8000 \text{ кг/м}^3$ . От того, что в дробь  $\rho = \Delta m/\Delta V$  вошли значки малости, смысл её почти не изменился – это вновь масса единичного объёма; здесь, правда, придётся добавить слова «если плотность будет такой же во всех точках это кубометра». Действительно, взятый в другом месте того же слитка образец такого же объёма даст чуть другую плотность; так, при выплавке газы поднимаются вверх, и там плотность обычно ниже. Если ухитриться уменьшить объём образца в 1000 раз, до  $0,001 \text{ мм}^3$ , то масса его уменьшится до 8 мг, а плотность не изменится. Но уменьшать объём до бесконечности нельзя; нужно, чтобы он включал ещё множество атомов железа и углерода, соединённых в определённом порядке (это и есть сталь), иначе при вычислении плотности не из чего будет суммировать массу. Можно показать, что  $0,001 \text{ мм}^3$  стали содержит всё ещё очень

много атомов – около  $10^{20}$ . Но если попытаться брать образцы микрокубиком с ребром  $10^{15}$  м (размер атомного ядра), то почти всегда мы будем зачерпывать вакуум; как известно, размер атома около  $10^{-10}$  м, и ядро занимает его крошечную часть. Для наглядности нужно представить на столе большой надувной шар диаметром в 1 м (это ядро), а ближайший точечный электрон разместить в 100 км. Но уж если нам посчастливилось микрокубиком попасть в ядро, то плотность будет чудовищная – порядка  $10^{16}$  кг/м<sup>3</sup>. Советский фантаст В. Савченко - физик по образованию - в повести «Чёрные звёзды» описал не очень тяжёлую из-за малой толщины плёнку из такого внутриядерного вещества нейтрида, выдерживающую ядерный взрыв, позволяющую создать конденсаторы гигантской ёмкости и пр. Выдающемуся физику-теоретику Дираку для описания зернистой структуры вещества пришлось даже, как в своё время Ньютону, ввести в математику новую  $\delta$ -функцию, где « $\delta$ » - знак греческой строчной (малой) буквы «дельта».

Но даже в вакууме использовать бесконечно малый объём не стоит: физика считает, что само пространство нашего мира на расстояниях порядка  $10^{-35}$  м (**фундаментальная** или **планковская** длина) должно изменить свои свойства.

Возвращаясь к методологии физики, отметим, что в последнее время всё шире используют численное моделирование с помощью ЭВМ - **вычислительную физику** - для изучения сложных, быстрых, опасных, редких и т.п. процессов. Именно здесь в наше время используют рекордные суперЭВМ, причём идёт мировая гонка за лидерство: без суперЭВМ невозможны быстрые глобальные прогнозы погоды, теоретическая проверка сохранности ядерного оружия и пр.

Итак, **физическая теория** – это взаимосвязанная совокупность, система знаний о каком-то достаточно широком круге физических явлений, изложенная на языке математики, но учитывающая реальные свойства мира. Есть электромагнитная, атомная, ядерная, квантовая и пр. теории. Они создавались постепенно путём обобщения результатов частных наблюдений и экспериментов; в основе теории в современной физике всегда лежат опыты. Очень долго - со времён древних греков и до Галилея – опора на опыты считалась, как в математике, необязательной. В итоге были и догадки Демокрита об атомарной структуре вещества, которые мы теперь считаем гениальными, и продержавшиеся тысячи лет неверные представления Аристотеля о движении тел.

Роль теории тройка. Во-первых, правильная теория очень выгодна – только она позволяет использовать полученные знания на практике далеко за рамками опытов, на базе которых эта теория была создана. Например, если пытаться опытным путём попасть ракетами в Луну, запуская их просто наугад, то попасть, может быть, когда-нибудь и удастся, но стоить это будет, с учётом цены каждого запуска в сотни миллионов долларов, просто сумасшедшие деньги. Действительно, и Луна не стоит на месте, и Земля движется относительно Солнца со скоростью около 30 км/с; поскольку полёт при нынешних возможностях занимает около 2 суток, то придётся учесть даже величину (на широте Горно-Алтайска это около 200 м/с – вовсе немало) и направление начальной скорости той точки поверхности Земли, откуда стартует ракета.

Во-вторых, хорошая теория, как фонарь, освещает изучаемую область физики, позволяя предсказать новые явления, а затем и применить их на практике. Исследования атомного ядра в начале 20 века считались теоретическими и никаких практических целей не ставили; но уже к середине века были созданы ядерное оружие и атомная энергетика.

В-третьих, теория позволяет расставить частные наблюдения и опыты, на которых она построена, по рангу (данный факт очень важен, а здесь не слишком существенный случай), и резко облегчить передачу накопленных знаний новым поколениям. Действительно, знаний человечество накопило столько, что завалить ими любого школьника или студента ничего не стоит. А какова плотность вольфрама при температуре его плавления? А какова эта температура? А как меняется плотность при нагреве? Для металлургии это важные сведения, но школьнику забивать ими голову не стоит: его нужно учить более важным вещам – что же такое вольфрам, плотность, температура, плавление, и по-

чему плотность меняется при нагреве почти любого металла.

Верховным судьёй любой физической теории, однако, всегда является опыт, базирующийся на физических измерениях. Критерий истины в физике – надёжная повторяемость полученных результатов в независимом опыте. Если величина не измеряема (биополе, биоплазма, психическая энергия, душа, аура и т. п.) или явление не удаётся надёжно воспроизвести (телепатия, ясновидение, полтергейст и пр.), то с точки зрения физики к научным понятиям и явлениям они пока не относятся; когда (и если) наука научится получать и измерять биополе или передавать телепатемы, тогда и будет предмет изучения. Это особенно важно подчеркнуть ввиду всё более широкого распространения всяческих суеверий и религии (вплоть до государственной поддержки), в основе которых всегда лежала и лежит не требующая доказательств вера.

Как и любая наука, физика имеет свой непрерывно расширяющийся и обновляемый набор понятий. Ещё раз отметим, что важнейшее достижение физики - количественное описание всех без исключения используемых понятий. Среди этих понятий есть **фундаментальные** - пространство, время, поле, заряд и ряд других – требующие особого подхода. Действительно, на достигнутом уровне развития человечества их не удаётся свести к более общим понятиям - таких просто ещё пока наукой не создано. И если для всех прочих, обычных понятий определение даётся с использованием более общих понятий («корова – это парнокопытное животное, у которого...», «механическое движение - это изменение положения тел в пространстве друг относительно друга с течением времени»; «электрический ток проводимости - это упорядоченное движение микрозарядов...» и пр.), то для каждого фундаментального понятия такой путь не годится. Данная задача, однако, издавна встречалась человеку и успешно им решалась. Так, если мы на прогулке в лес встретим что-то явно живое, но не похожее ни на одно известное нам существо, то при рассказе будем просто указывать набор его уникальных отличительных признаков («размером со слона, круглое, медленно ползёт и шипит, как паровоз»). Аналогично определяют фундаментальные понятия физики – просто перечисляют их отличительные признаки. Количественному описанию это никак не мешает.

### **Взаимосвязь физики и техники.**

Успехи физики и выдающаяся роль её в прогрессе человечества (в том числе в становлении других наук - химии, биологии, медицины, информатики, астрономии и пр.) неоспоримы. Попробуйте представить современную медицинскую науку без оптических и электронных микроскопов, электронных кардиостимуляторов, рентгеновских аппаратов, ультрацентрифуг, компьютерных томографов, лазерных скальпелей и т.д. и т.п. Именно развитие техники и технологии на базе физических исследований создало современную цивилизацию со всеми её достижениями (и проблемами также). Это развитие, в свою очередь, обеспечивает физику всё более мощными средствами исследования мира.

Все области физики принесли свои плоды. Без заложенных ещё Ньютоном основ механики не появились бы способы расчёта прочности зданий, транспортных средств, всевозможных изделий, узлов и деталей. Термодинамика и молекулярная физика сделали возможным создание не только громадных паровых котлов, но и домашних холодильников. Без оптики мы не увидели бы микробов и мало что видели бы на звёздном небе. Ядерные исследования сделали наш мир опаснее, но дали и надежду избежать надвигающегося энергетического кризиса или падения кометы. Очень наглядны результаты исследований электромагнитных явлений: представьте мир, в котором по каким-то причинам остановились все генераторы и электромоторы (в том числе на теплоцентралях и в котельных), погасли электрические светильники, не работают электрообогреватели, отказали телефон, телеграф, радио и телевидение, прекратили работу компьютеры и спутники связи! Вот почему основы физики должен знать любой культурный человек.

### **Лекция 3.**

Основные темы. Особенности физики как учебной дисциплины. Измерения в физике. Системы единиц. Основные единицы СИ.

### Особенности физики как учебной дисциплины.

Помимо физики как области науки есть и физика как учебная дисциплина. Именно с ней имеют дело школьники и студенты; в дальнейшем лишь незначительная их часть будет профессионально заниматься научной деятельностью в одной из множества областей физики. Особенности освоения есть у любой учебной дисциплины: в географии не обойтись без карт, у медиков без работы с трупами, в геологии без полевых практик и т.д. Есть, однако, и общее: целью любой учебной дисциплины является приобретение знаний, умений и навыков. Но в основе знаний всегда лежит процесс **ЗАПОМИНАНИЯ, ЗАУЧИВАНИЯ**. Действительно, любая область науки - математика, физика, педагогика, медицина - опирается на определённый набор понятий ("производная - это...", "педагогика - это...", "электрический ток - это..."), фактов и явлений ("Волга впадает в Каспийское море", "одноименные заряды отталкиваются", "первым признаком заболевания дизентерией является..."), законов, теорем и закономерностей ("заряд в замкнутой системе сохраняется", "квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов", "приём аспирина способствует снижению температуры больного"), использует собственные графические и символные средства (чертежи, карты, формулы, схемы); и всё это надо заучить, запомнить, узнать желающему изучить данную науку. Не надо путать зубрёжку и заучивание: в первом случае смысл запоминаемого неизвестен, как в детской считалке "Энебенераба...", так что заучивание теоремы Пифагора не будет зубрёжкой, если осмыслены и заучены понятия "прямоугольный треугольник", "катет", "гипотенуза", "квадрат", "сумма". Вопрос о понимании, осмысливании материала достаточно сложен, чтобы на нём здесь останавливаться; важно, что проработка, осмысливание, понимание нового опирается на уже заученное, усвоенное знание. Не изучавшему английский язык фраза "Ай спик рашн" так же непонятна, как не изучавшему физику - "Ток насыщения пропорционален температуре катода". Очень часто студент заявляет, что он со школы **НЕ ПОНИМАЕТ** физику, а на деле оказывается, что он её **НЕ ЗНАЕТ**; не помнит (или помнит примерно), что такое катод, температура, ток; не заучил, какими буквами обозначаются эти величины и как эти буквы пишутся и читаются. В формуле  $F=ma$  не требуется что-то **ПОНИМАТЬ**; надо **ЗНАТЬ**, что это второй закон Ньютона (а преподавателю помнить, что правильное ударение - на первом слоге, а не последнем); что  $F$  читается как "эф" и обозначает в данной формуле силу (в других формулах эта же буква может обозначать уже постоянную Фарадея, лучистый поток, свободную энергию системы и т.д. - букв в физике давно не хватает, в ходу русский, латинский, греческий алфавиты - до иероглифов еще дело не дошло, а вот всякие штрихи, звездочки, индексы при буквах используются); что сила - это...; что измеряется сила в ньютонах, которые можно сокращенно обозначать буквой  $N$ , а  $1 N$  - это... И если в данный момент студент **НЕ ПОМНИТ**, что такое масса или в чём измеряется ускорение, то причём здесь понимание? **ФИЗИКУ НАДО УЧИТЬ НАИЗУСТЬ**, как иностранный язык: по десять понятий, формул, обозначений каждый день, по несколько раз, пока не запомнишь - и через год-два **РЕГУЛЯРНЫХ ЗАНЯТИЙ** заговоришь. **УЧЕБА ПО НАСТОЯЩЕМУ - ЭТО ТЯЖЁЛЫЙ ТРУД**, и ничего не добьются те, кто мечтает "понимать" физику без ежедневного труда по её **ИЗУЧЕНИЮ**. Корень учения горек, но плоды его (пока хотя бы в виде пятерки на экзамене) сладки.

Кстати, аналогия с иностранным языком имеет и прямой смысл: в физике множество понятий обозначается словами иностранных языков, в основном латинского и греческого. Масса, инерция, конденсатор, индукция, трансформатор, поляризация, интерференция, энтропия и др. - нам их приходится заучивать, а итальянцу или англичанину они знакомы с детства как слова родного языка. То же с обозначениями: все без исключения физические величины имеют меру, эталон для сравнения, единицу измерения (в этом заслуга многих поколений физиков; а может ли медицина **ИЗМЕРИТЬ** тяжесть болезни, педагогика - степень мастерства учителя, а психология - силу эмоций?), требуя какой-то буквы для описания количества каждой такой величины. Эти буквы заимствованы в основном из латыни - языка международного общения учёных в пору становления физики как науки.

Нам приходится заучивать, что  $F$  - обозначение силы,  $v$  - скорости,  $a$  - ускорения и т.д.; для американца же или итальянца это просто первые буквы соответствующих слов родного языка. Физикам ещё ничего, а какво медикам или биологам - заучивать названия всех болезней, костей, мышц, лекарств, растений, насекомых на латыни? Вот где зубрёжка!

"Но это сколько же надо заучивать, у нас не одна физика!" - скажут иные студенты. Доля истины здесь есть (если забыть, что большинство понятий, законов, формул в курсе физики вуза изучалось 5 лет всеми без исключения в школе), поэтому в вузе и существуют преподаватели: они в соответствии с программами отбирают материал и организуют изучение, выделяя важнейшее, помогая и контролируя. Опытный преподаватель знает, что **ВАЖНЕЙШИХ** понятий, формул, явлений, законов, опытов, схем, графиков, констант за семестр сообщается студентам сотни две-три, и заучить их по силам даже тому, кто ничего не помнит (невероятный случай!) со школы - было бы желание. Рецепт прост: запиши это важнейшее несколько раз (моторная память самая прочная - кто научился ездить на велосипеде, ездит всю жизнь); проговори вслух и послушай товарища (используй слуховую память), подчеркни красной пастой, обведи рамочкой и внимательно рассмотри (зрительная память самая ёмкая - говорят же, что лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать). Для облегчения студенческого труда важные понятия, которые следует заучить, в тексте лекций будут выделены **жирным шрифтом**, а важнейшие - **ЖИРНЫМ КРУПНЫМ ШРИФТОМ**; важные мысли подчёркнуты. Аналогично будут отмечены важнейшие формулы; кроме того, их номера заключены не в одинарные - (1.1), а в двойные рамки - **{(1.2)}**. Первая цифра здесь соответствует номеру лекции, вторая - номеру формулы на данной лекции.

**УМЕНИЕ - ЭТО ЗНАНИЕ В ДЕЙСТВИИ.** Значит, если хочешь уметь излагать материал другим, нужно постоянно пробовать это делать, использовать любую возможность: для самого себя, вслух или на бумаге; для товарищей на вечере, собрании, в комнате общежития, перед уроком; для преподавателя на лабораторных занятиях в ходе теоретического собеседования, на собеседовании или экзамене. Можно продолжить аналогию с изучением иностранного языка: мало запомнить, как пишутся, читаются и произносятся слова; нужно ещё знать правила этого языка и обязательно в нём практиковаться, используя любую возможность. Лишь тогда будут понятны вопросы преподавателя и в ответ не выговорятся исковерканные фразы "Заряд порождается изменением магнитного поля", "Камень летит вверх из-за силы инерции" или "Ёмкость проводника определяется его зарядом".

Итак, при изучении теоретического материала учти следующее.

а) Серьёзно настройся на **ЗАУЧИВАНИЕ** важнейшего материала. Используй все виды памяти, не забывая главного: повторение - мать учения, а регулярную работу (по 10 понятий и формул **КАЖДЫЙ** день) не заменит никакой штурм перед экзаменом.

б) Учись говорить на **ПРАВИЛЬНОМ** физическом языке. Заучи, какими буквами обозначаются физические величины в курсе, как эти буквы пишутся и читаются. Правильно произноси фамилии ученых. Не забывай единицы всех величин, значения ряда констант. Часть таких сведений собрана в разделе 5.

в) Учись **ГОВОРИТЬ** на физическом и математическом языке, излагать материал. Основное оружие педагога - слово. А много ли приходится школьнику говорить на уроках? По подсчетам В. Ф. Шаталова - в лучшем случае 2 минуты в день. И вот этот "молчаливый" школьник поступает на физмат. Здесь возможностей может быть еще меньше - лекции, практические и лабораторные занятия могут быть организованы так (хотя это, на мой взгляд, неверно), что за семестр студент вообще ни разу не побеседует с преподавателем. А как такой педагог будет работать в школе или вузе? Поэтому постоянно читай литературу и конспекты лекций (много читающие люди не помнят правил родного языка, но правильно говорят и пишут); внимательно слушай речь преподавателей, стараясь не пропустить ни единого занятия; слушай ответы товарищей и запоминай их ошибки - но самое главное, используй любую возможность потренироваться в изложении материала на ИРС,

консультации, практическом занятии, в лаборатории, на коллоквиуме, для соседа по общежитию и т.д. и т.п.

г) Работай **РЕГУЛЯРНО**. Перед новой лекцией просмотри материал предыдущей; сразу выясни все непонятное на самой лекции, на консультации, в учебнике или у товарищей.

Преподаватель информатики и физики, в отличие от математика или историка, должен не только умело излагать теоретический материал, но и владеть навыками экспериментатора. Собрать сеть класса, подключить принтер, устранить простейшую неисправность, пользоваться осциллографом и другими измерительными приборами - всё это надо уметь. Тем более это справедливо для будущего физика-экспериментатора. А главная проблема для выпускника (и особенно выпускницы) - незнание и боязнь приборов, неумение работать руками. Выход один - приобретать экспериментальные навыки, регулярно работая с приборами, причем именно своими руками, а не глядя со стороны. **ВПРИГЛЯДКУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАВЫКИ НЕ ПРИОБРЕТЁШЬ**. Попробуй-ка научиться вождению автомобиля с пассажирского сидения!

Поэтому студентам не только читаются лекции, но и даётся возможность поработать в лаборатории. При добросовестной самоподготовке – материал лекций проработан и усвоен, теоретическое собеседование сдано с первого раза - на эксперимент остаётся до трёх часов в неделю. Этого вполне достаточно для тщательного проведения измерений, которые сравнительно просты, освоения оборудования (оно сознательно взято, в значительной части, учебного типа) и отработки наиболее важных экспериментальных навыков (работа с измерительными приборами, сборка и проверка работоспособности электрических схем и пр. - см. раздел 2). Эти навыки будут контролироваться при сдаче лабораторных работ.

#### **Измерения в физике.**

Уже отмечалось, что физика - наука количественная. Называть её точной наукой, с моей точки зрения, всё же не совсем верно, т.к. физика имеет дело с реальным миром, а не с абстракциями, как математика. В математике результат действия "1+1" всегда одинаков и не зависит от того, что складывается. В реальном же мире это может быть автомобильная катастрофа, новая семейная пара, два яблока или ядерный взрыв. Все без исключения законы физики не являются абсолютно точными: всегда существуют границы и условия их применимости. Так и любое измерение всегда является неточным, имея погрешность, причём эта погрешность неустранима в принципе; её можно только уменьшить и учесть, но до конца исключить нельзя.

**Измерить любую величину** - значит сравнить её путём строго оговоренной стандартной процедуры с однородной величиной, условно принятой за единицу. Благодаря многовековым усилиям науки абсолютно все физические величины имеют меру, эталон для сравнения, единицу измерения. Всем известны такие эталоны массы, как гири, и процедуры взвешивания на рычажных и пружинных весах. Здесь наиболее важны два первых момента - стандартная процедура сравнения (представим, что в магазинах товары взвешивают на руках) и сравнение с однородной величиной (длина или объём эталона массы несущественны). Условность выбора единиц величин достаточно очевидна; основным критерием здесь является удобство использования эталона на практике. Так, всемирный эталон массы 1 килограмм неизменен со времени его введения в 19 веке. Сейчас он только сделан из особо прочного платиноиридиевого сплава и хранится во Франции, которая предложила эталон, в особо защищённых условиях; эталоны массы всех других государств мира (вплоть до гирь в соседнем магазине или физической лаборатории) сравниваются только с ним. Эталоны, например, длины и времени неоднократно менялись: первоначально это были привычные линейки и часы (только изготовленные со всей возможной точностью), а теперь - сложнейшие установки, использующие для эталонирования природные процессы в атомах и оптические измерительные системы.

#### **Системы единиц. Основные единицы СИ.**

В принципе, единицы всех физических величин можно выбрать независимо друг от друга. На практике здесь возникают большие трудности (например, требуется очень много



эталонов), поэтому используются **системы взаимосвязанных единиц**: несколько основных единиц задаются с помощью эталонов, а все остальные выражаются через основные по известным формулам связи. Здесь есть свои проблемы (так, в часть формул приходится вводить численные коэффициенты), но преимуществ больше. Как известно, сейчас удалось согласовать единую **международную систему единиц** (СИ - система интернациональная), использующую такие основные единицы: 1) метр (м) равен  $1\ 650\ 763,73$  длин волн в вакууме излучения, возникающего при переходе между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$  атомов Кг-86; 2) килограмм (кг) - масса эталона, хранящегося во Франции; 3) секунда (с) равна  $9\ 192\ 631\ 770$  периодов излучения, возникающего при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атомов Cs-133; 4) Ампер (А) - сила постоянного тока, который при прохождении по длинным тонким параллельным круглым проводникам, удалённым в вакууме на расстояние в 1 м, вызывает силу взаимодействия в 0,2 мкН на каждый метр длины проводников; 5) Кельвин (К) равен  $1/273,16$  от термодинамической температуры тройной точки воды; 6) моль - количество (масса) вещества, содержащее столько же атомов (для веществ с молекулярной структурой - молекул), сколько их содержится в 12 граммах углерода C-12; 7) радиан (рад) - угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу; 8)стерадиан (ср) - телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную квадрату радиуса; 9) кандела (кд) - сила света источника, испускающего в заданном направлении монохроматическое излучение частотой 540 ТГц энергетической силой света  $1/683$  Вт/ср.

Видно, что для определения основных единиц приходится использовать вспомогательные единицы (силы - 1 Н, частоты - 1 Гц, и пр.), сложные понятия (монохроматическое излучение, переходы в атомах, сверхтонкая структура и пр.), точно заданные условия (круглые длинные тонкие параллельные проводники, удалённые в вакууме на 1 м). Недаром возникла специальная наука - метрология, занимающаяся проблемами измерений величин. Заметим, что выражение вспомогательной величины через основные единицы называется **размерностью**. Так, из второго закона Ньютона  $F = ma$  размерность силы (её записывают в квадратных скобках) будет  $[F] = MLT^{-2}$ , где М - размерность массы, L - длины, а Т - времени. В любом физическом равенстве размерность левой и правой частей должна быть одинаковой (**правило размерностей**), т.к. законы природы не могут зависеть от выбора единиц измерения. Следует помнить, что часть величин (угол, телесный угол, диэлектрическая проницаемость и пр.) **безразмерны**, т.е. имеют нулевые показатели степени в формуле размерности.

#### Лекция 4.

Основные темы. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей измерений. Определение приборной погрешности прямого измерения.

#### Прямые и косвенные измерения.

Существуют два вида измерений: ПРЯМЫЕ, когда величину определяют с помощью измерительного прибора прямым сравнением с эталоном, и КОСВЕННЫЕ, когда величину рассчитывают по известной формуле на базе данных прямых измерений. Так, длину мы измеряем линейкой, время - часами, напряжение - вольтметром и т.п.; для определения же средней скорости движения нужно сначала прямо измерить линейкой путь S и часами время t, а затем применить формулу  $v = S/t$ .

Любой измерительный прибор имеет ряд характеристик, важнейшими из которых являются: ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ - наибольшее значение измеряемой величины; ЦЕНА ОДНОГО ДЕЛЕНИЯ, равная дроби с пределом измерения в числителе и общим числом делений шкалы в знаменателе; КЛАСС ТОЧНОСТИ, о котором подробнее сказано ниже.

#### Погрешность. Виды и типы погрешностей измерений

Уже отмечалось, что все без исключения законы физики не являются абсолютно точными: всегда есть границы и условия их применимости. Так и любое измерение всегда является неточным, имея **погрешность, ошибку**, причём эта погрешность неустранима в

принципе; её можно лишь уменьшить и учесть, но до конца исключить нельзя.

Ошибки, возникающие при измерениях, можно классифицировать как по их происхождению, так и по характеру их проявления.

По своему происхождению ошибки делятся на субъективные (по вине человека, а не природы) и объективные (не связанные с человеком). Кроме того, те и другие могут быть инструментальными и методическими. Инструментальные могут быть обусловлены и ошибками человека (взял неисправный прибор или просто спутан вольтметр с амперметром), и объективным несовершенством применяемых измерительных приборов. В этом случае они могут быть уменьшены за счет применения более точных приборов, но граница всегда есть, и определяется она уровнем развития цивилизации. Так, размер детали можно измерить линейкой, микрометром и сверхточным оптическим методом. Очевидно, что в третьем случае ошибка измерения будет существенно меньше, чем в первом, но она всё равно будет.

Методические погрешности возникают, например, из-за того, что реальные физические процессы всегда отличаются от их теоретических моделей. Так, формула периода колебаний математического маятника верна лишь при малой амплитуде колебаний; формула Стокса, определяющая силу трения при движении шарика в вязкой жидкости, справедлива только в случае идеальной сферы, и т.д. Обнаружить и учесть такую погрешность можно лишь путём измерения той же величины совершенно иным, независимым методом. Если же при взвешивании не учитывается сила Архимеда, а при измерении сопротивления - влияние проводов омметра, то это погрешность метода, которую можно уменьшить и даже полностью исключить при смене метода (например, взвешиванием в вакууме) и внесении поправок (измерив сопротивление проводов, вычесть его).

По характеру проявления ошибки бывают систематические и случайные. Систематическая погрешность может быть обусловлена как приборами, так и методикой измерения. Она имеет две характерные особенности. Во-первых, систематическая погрешность всегда либо положительна, либо отрицательна, и не меняет своего знака от опыта к опыту. Так, данная 100-граммовая гиря в лаборатории не является абсолютно точной десятой частью мирового эталона килограмма, внося систематическую погрешность; это справедливо для любого измерительного прибора (линейки, секундомера, амперметра и пр.). Во-вторых, систематическую погрешность нельзя уменьшить за счет увеличения числа измерений. Например, если в отсутствие внешних воздействий стрелка измерительного прибора не стоит на нуле, то и во всех измерениях будет систематическая ошибка.

Случайная ошибка также может быть как инструментальной, так и методической. Причину её появления установить чаще всего невозможно – это могут быть различные помехи, случайные толчки, вибрации, неточно взятый отсчет по прибору и т.д. Случайная погрешность бывает и положительной и отрицательной, причем непредсказуемо изменяет свой знак от опыта к опыту. Значение её можно уменьшить путем увеличения числа измерений.

Итак, существуют 3 основных вида погрешностей измерений. 1) **ПРОМАХИ** или **ПРОСЧЁТЫ** - это грубые и чаще всего субъективные (по вине человека, а не природы) ошибки, связанные с невнимательностью экспериментатора, его слабыми знаниями, испорченным прибором, небрежностью записей и т.п. По незнанию спутаны милли- и микроамперметры, неверно определена цена деления, не так прочитана плохо написанная цифра в тетради, с ошибкой сделаны расчёты - всё это и есть промахи. Первое, что здесь можно посоветовать - быть внимательным, знающим, аккуратным и пр. В ряде случаев может помочь повторное (контрольное) измерение: если результат при тех же условиях опыта резко, на десятки процентов, отличается от первого, причиной может быть промах. Измерения придётся в любом случае повторять, пока результаты не станут близкими или повторяющимися; подробнее об этом сказано ниже. 2) **СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ** - это погрешности, остающиеся постоянными при неизменных условиях опыта. Они являются следствием объективных, не связанных с человеком причин, основ-

ные из которых - неточность измерительных приборов (поэтому систематическую погрешность называют иногда приборной) и метода измерений. 3) **СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ** - это погрешности, изменяющиеся непредсказуемым, случайным образом при неизменных условиях опыта. Они имеют и субъективную, и объективную природу: например, показания всех стрелочных приборов зависят от положения глаз наблюдателя (и это отлично знают продавцы); показания магнитного зонда могут меняться от опыта к опыту даже при неизменном его положении (т.к. за стенкой включается холодильник, о чём экспериментатор не догадывается), и т.д. Особенность таких ошибок - их неустранимость в данном опыте из-за случайного характера; но именно в случайности скрыт простой способ учёта этой погрешности. Действительно, теория вероятностей доказывает, что случайные процессы могут менять показания и в сторону увеличения, и в сторону уменьшения. Значит, повторив измерения многократно и усреднив показания, можно случайные ошибки уменьшить.

Значит, промахи могут и должны быть исключены; систематические ошибки (в конечном счете) можно только учесть; случайные погрешности можно как учесть, так и уменьшить.

Вводят 2 типа погрешностей - **АБСОЛЮТНЫЕ** и **ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ**. Уже отмечалось, что никакую физическую величину невозможно измерить абсолютно точно: как бы точно не был поставлен опыт, измеренное значение величины  $x$  будет отличаться от ее истинного значения  $X_{ист}$ . Разница между этими значениями  $\Delta x$  и есть **АБСОЛЮТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ** или **абсолютная ошибка** измерения:

$$\Delta x = x - X_{ист} \quad \{(4.1)\}$$

Единица её измерения, очевидно, та же, что у величины  $x$ . Как следует из (4.1), величина  $\Delta x$  может быть как положительной, так и отрицательной, причём знак этот неизвестен..

Но одной абсолютной погрешности недостаточно. Действительно, ошибка измерения в 2 метра - это много или мало? Нужно сравнить с самой измеряемой величиной, т.е. найти **ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ**

$$\delta x = |\Delta x| / X_{ист} \quad \{(4.2)\}$$

Принято рассчитывать её в процентах. Тогда видно, что для значения  $x = 100$  м абсолютная погрешность в 2 м составляет 2 %. Следует иметь в виду, что в технике, строительстве и во многих других случаях считают допустимой погрешность до 5 %. Этот же критерий можно использовать при учебных измерениях в наших лабораториях.

Заметим, что критерий допустимой ошибки до 5 % позволяет найти и границы понятий «много больше» и «много меньше». Если какая-то величина составляет менее 5 % другой (т.е. меньше хотя бы в 25, а лучше в 30 раз), то она много меньше этой другой величины, и наоборот.

При определении ошибок измерений важно иметь в виду, что формулы (4.1) и (4.2) содержат истинное значение измеряемой величины, которое точно знать невозможно. Значит, величина погрешностей **в принципе не может быть рассчитана точно** - можно лишь оценить эти значения, т.е. найти их приближенно с той или иной степенью достоверности. Поэтому все расчеты, связанные с определением погрешностей, неизбежно носят приближенный характер.

#### **Определение приборной погрешности прямого измерения**

Пусть надо определить истинное значение  $X_{ист}$  какой-то величины в прямом измерении. Заранее не известно, какие виды ошибок встретятся и какая погрешность - систематическая или случайная - будет больше, поэтому последовательность действий должна быть такой.

a1) Для исключения промахов и определения, есть ли вообще в наших опытах случайная погрешность, **НУЖНО ВЫПОЛНИТЬ НЕСКОЛЬКО** (на практике **НЕ МЕНЕЕ ТРЁХ-ПЯТИ**) **ИЗМЕРЕНИЙ** при неизменных условиях. Пусть все они дали одинаковые значения  $x$ . Это значит, что для фиксации случайных изменений нашей величины не хватает чувствительности взятого измерительного прибора, и тогда нужно искать только систематическую приборную погрешность  $\Delta x_{\text{сист}}$ . Истинное значение  $X_{\text{ист}}$  величины будет практически достоверно (с вероятностью более 99,7%) лежать в интервале

$$X_{\text{ист}} = x \pm \Delta x_{\text{сист}} \quad \{(4.3)\}$$

На вопрос "А какова всё же истинная величина  $x$ ?" нужно задать встречный вопрос "С какой точностью?". Абсолютная истина недостижима, и хотя все значения величины у нас не отличаются, существует неустранимая систематическая погрешность, которую можно лишь учесть. Поэтому с помощью абсолютной погрешности указывают **ИНТЕРВАЛ ЗНАЧЕНИЙ**, в пределах которого лежит истинное значение. Таким образом, **ЕДИНСТВЕННО ПРАВИЛЬНЫЙ ОТВЕТ** в данной ситуации для физика имеет вид (4.3), и ничего более определённого сказать о величине нельзя **В ПРИНЦИПЕ**.

Абсолютную систематическую погрешность можно считать (для учебных измерений) постоянной для всего опыта и определяемой лишь точностью приборов. Используют ряд способов её определения.

1) Введём понятие **ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ** прибора как наибольшего значения измеряемой им величины. На шкале или в паспорте электроизмерительных приборов обычно задан **КЛАСС ТОЧНОСТИ  $k$** , т.е. относительная погрешность измеряемой величины в процентах от предела измерения  $x_{\text{пред}}$ . Тогда абсолютную погрешность измеренной величины легко найти по формуле

$$\Delta x = (x_{\text{пред}} \cdot k) / 100\% \quad \{(4.4)\}$$

Существуют приборы 7-ми стандартных классов: 0.1, 0.2, 0.5 (прецизионные или особо точные), 1.0, 1.5, 2.5 и 4.0; если класс не указан, то ошибка превышает 4% и прибор класса точности не имеет (о таких приборах – их зовут индикаторами - см. ниже). Есть и более точные приборы. Нельзя путать класс точности с относительной погрешностью опыта: измеряемая величина  $x$  обычно меньше предела измерения, поэтому систематическая относительная погрешность  $\delta x = (\Delta x / x) \cdot 100\%$  обычно больше класса точности, причём тем больше, чем меньше величина  $x$  в сравнении с пределом измерения  $x_{\text{пред}}$ . Действительно, абсолютная погрешность  $\Delta x$  определяется только классом точности и пределом измерения и постоянна у данного прибора. Значит, для снижения относительной систематической погрешности нужно стремиться к показаниям прибора, близким к пределу измерения. Это и служит, помимо соображений стоимости, причиной изготовления многопределных приборов, подробнее рассмотренных ниже.

2) Иногда на шкале (линейки, секундомеры и пр.), в паспорте (весы), на корпусе прибора (микрометр, штангенциркуль) сразу указана абсолютная погрешность.

3) Введём понятие **ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ ШКАЛЫ**, т.е. частного от предела измерения и числа делений шкалы. Тогда для приборов без класса точности абсолютная погрешность принимается равной половине **ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ ШКАЛЫ**.

Затем обязательно вычисляем по (4.2) относительную ошибку  $\delta x = (\Delta x_{\text{сист}} / x) \cdot 100\%$ .

Она не должна, как правило, превышать 5 %. Относительная погрешность покажет **ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ**; если она недостаточна для данных целей - используй другую методику и более точные приборы измерения, а если их не существует - создавай. В науке множество открытий связано с развитием техники и методики измерений, повышением их точности. До изобретения микроскопа ничего точно не было известно о размерах микро-

бов, до опытов Резерфорда - о размерах ядра и пр., хотя теоретических предсказаний всегда хватало. Процесс этот бесконечен: и сейчас ничего точно не известно о структуре электронов или гравитационных волнах.

Заметим, что если измерение удалось выполнить всего один раз (и такое бывает – например, удалось поймать какой-то редкий процесс или просто мы впервые измерили для себя время поездки на автомобиле в Бийск), то полученное значение, разумеется, не достоверно, но приборную погрешность оценить всё равно можно.

**ПРИМЕР.** Пусть определение напряжения сети делается вольтметром с пределом измерения 300 В, с числом делений на шкале 150 и классом точности 2.5; стрелка при 3-х замерах отклонялась всё время на 110 делений. Тогда цена деления равна 2 В/деление, и прибор показал 220 В. Учесть надо лишь приборную погрешность, которая равна  $\Delta U = (2.5 \cdot 300)/100 = 7,5$  В. Значит,  $U=220 \text{ В} \pm 7.5 \text{ В}$ , а  $\delta U=3.4\%$ . Относительная погрешность, как и должно быть, превышает класс точности.

Если тем же вольтметром измерять напряжение, например, на выходе понижающего трансформатора, составившее 127 В, то абсолютная погрешность не изменится, а вот относительная погрешность вырастет до 6% и станет слишком большой. Заметим, что лишь на приборах класса не ниже 2,5 измерения на половине шкалы ещё допустимы, т.к. относительная погрешность здесь не превысит 5%.

### Лекция 5.

Основные темы. Вычисление случайной и полной погрешности прямых измерений. Вычисление погрешности косвенных измерений.

#### **Вычисление случайной и полной погрешности прямых измерений.**

а2) Пусть мы выполнили 2-3 измерения, и они дали разные результаты. Тогда нужно повторить измерения как минимум ещё 2-3 раза и попытаться понять причину расхождения. Если одно из значений резко отличается от других, а все прочие одинаковы, то просто отбрасываем отличающееся значение как промах. Если же все значения отличаются, то придётся выполнить целую серию измерений, чтобы сделать случайную ошибку достаточно малой – например, не больше систематической или просто меньше допустимой в данных измерениях ошибки В учебных измерениях можно считать допустимой полную относительную ошибку измерений, учитывающую все систематические и случайные погрешности, если она не превышает 5 %.

Итак, пусть все  $n$  измерений дали разные значения  $x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_i \dots x_n$  вследствие влияния случайных факторов. Тогда делается достаточно сильное допущение, что влияющие факторы действительно случайны и подчиняются законам теории вероятностей; выполняется оно не всегда, но в наших учебных измерениях этими исключениями смело можно пренебречь. В этом случае из теории ошибок следует, что отклонения измеренных значений от истинного удовлетворяют распределению Гаусса (нормальному распределению в виде колокола), т.е. отклонения на одно и то же значение в сторону уменьшения и увеличения равновероятны. Кроме того, малые отклонения гораздо вероятнее, чем большие, поэтому сильные отклонения, скорее всего, являются промахами и должны быть отброшены (иногда, правда, при этом экспериментатор «отбрасывает» и новое физическое явление вместе с Нобелевской премией). Значит, наиболее близким к истине значением будет **СРЕДНЕАРИФМЕТИЧЕСКАЯ (средняя) величина**

$$\langle x \rangle = (x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n) / n \quad \text{или} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \{(5.1)\}$$

б) В теории вероятностей доказано, что среднеарифметическое значение измеряемой величины стремится к истинному только при бесконечно большом числе измерений, а вот при небольшом числе измерений ( $n \leq 10$ ) среднее значение может существенно отличаться от истинного. Возникает ещё одна цель измерения – найти такой интервал, в котором с наперёд заданной вероятностью  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) находится истинное значение измеряемой величины. Этот интервал называют **доверительным интервалом**, а неразрывно связан-

ная с ним величина  $\alpha$  – **доверительной вероятностью** (надежностью, достоверностью).

Очевидно, что ширина доверительного интервала зависит от того, насколько сильно отличаются отдельные измерения  $x_i$  величины от среднего значения  $\bar{x} \equiv \langle x \rangle$ . Для этого прежде всего находим n абсолютных случайных погрешностей каждого измерения

$$\Delta x_i = \langle x \rangle - x_i. \quad (5.2)$$

Эти данные также случайны, поэтому более близкой к истине будет **среднеарифметическая абсолютная погрешность**, взятая по модулю

$$\langle \Delta x \rangle = (|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|) / n. \quad \{(5.3)\}$$

которая в простейших случаях (в школе, например) и принимается за абсолютную случайную погрешность опыта.

На этом этапе можно попытаться обнаружить промахи: расчёт показывает, что при нормальном распределении вероятность абсолютной ошибки какого-то измерения  $\Delta x_i$ , втрое превышающей среднее значение  $\langle \Delta x \rangle$ , равна всего 0,2%. Следовательно, если для какого-то измерения  $\Delta x_i > 3|\langle \Delta x \rangle|$ , то имеет смысл отбросить данное показание как промах. При этом, конечно, придётся выполнить все расчёты заново.

Но и это всё же не окончательный ответ. Во-первых, число измерений здесь должно быть бесконечным; во-вторых, не указана вероятность приближения к истине.

В теории вероятностей доказывается, что если нас устраивает достоверность 50 %, то наиболее вероятная ошибка

$$\delta_B = 0,67 \left\{ \left[ \sum_n (x_i - \langle x \rangle)^2 \right] / [n(n-1)] \right\}^{1/2} \quad (5.4)$$

При  $n \rightarrow \infty$  формула примет вид

$$\delta_B \approx 0,67 \left[ \sum_n (x_i - \langle x \rangle)^2 \right]^{1/2} / n. \quad (5.4a)$$

Здесь при учёте только случайной погрешности истинное значение с вероятностью  $\alpha = 50$  % будет лежать внутри доверительного интервала

$$X_{\text{ист}} = \langle x \rangle \pm \delta_B. \quad (5.5)$$

Надёжность значения явно недостаточна, поэтому практически всегда считают хотя бы среднеквадратичную ошибку (стандартное отклонение среднего), которая больше наиболее вероятной и равна

$$\langle \sigma \rangle = \left\{ \left[ \sum_n (x_i - \langle x \rangle)^2 \right] / [n(n-1)] \right\}^{1/2} \approx \left[ \sum_n (x_i - \langle x \rangle)^2 \right]^{1/2} / n. \quad \{(5.6)\}$$

Здесь достоверность при неопределённо большом ( $n \rightarrow \infty$ ) числе измерений достигает примерно 68 %.

При ответственных измерениях этого также недостаточно: например, в медицинской статистике для измерения среднего роста или массы тела мальчиков 14-летнего возраста, живущих в данной местности, достоверность должна быть как минимум 95 %. Кроме того, на практике число измерений конечно, что увеличивает реальную ошибку: если при медицинских измерениях выборка должна составлять не менее 100 человек, то в учебной лаборатории выполняется всего 3-5 замеров.

. Учтём, как именно вырастет ошибка при данном конечном числе измерений  $n$ , позволяют задаваемые в таблицах коэффициенты Стьюдента  $t_{n \alpha}$ . Доверительный интервал при достоверности  $\alpha$  ищем по формуле

$$\Delta x_\alpha = \langle \sigma \rangle t_{n \alpha}. \quad \{(5.7)\}$$

Так, для достижения достоверности  $\alpha = 70$  % при числе измерений  $n = 5$  берётся увеличивающий коэффициент  $t_{n \alpha} = 1,156$ ; при  $n = 20$  он уменьшается до 1,064; при  $n \rightarrow \infty$  имеем  $t_{n \alpha} = 1,036$ . Если нужно увеличить достоверность до 90 %, то (см. таблицу 1) при  $n = 5$  бе-

рём коэффициент  $t_{n\alpha} = 2,13$ , при  $n = 5$  берём  $t_{n\alpha} = 1,73$  и т.д. Итак, при учёте только случайной погрешности истинное значение величины с вероятностью  $\alpha$  будет лежать внутри интервала

Табл. 1. Некоторые значения коэффициентов Стьюдента  $t_{n\alpha}$

Число измерений n	Надежность (достоверность) $\alpha$				
	50%	90%	95%	99%	99,9 %
2	1	6.31	12.71	63.66	636.62
3	0.82	2.92	4.30	9.92	31.60
4	0.76	2.35	3.18	5.84	12.94
5	0.74	2.13	2.78	4.60	8.61
...	...	...	...	...	...
10	0.70	1.81	2.23	3.17	4.78
...	...	...	...	...	...
20	...	1.73	2.09	2.86	3.88
...	...	...	...	...	...
50	...	1.68	2.01	2.68	3.50
...	...	...	...	...	...
100	...	1.66	1.98	2.63	3.39
...	...	...	...	...	...
$\infty$	0,67	1.65	1.96	2.58	3.29

$$X_{\text{ист}} = \langle x \rangle \pm \Delta x_{\alpha} \quad \{(5.8)\}$$

в) Теперь находим, как показывалось выше, абсолютную систематическую погрешность.

г) Сравниваем эти две погрешности. Если они отличаются в несколько раз, то учитываем только ту, которая больше; если они имеют близкие значения, то полная абсолютная ошибка измерений

$$\Delta x_{\text{полн}} = [(\Delta x_{\text{сист.}})^2 + (\Delta x_{\alpha})^2]^{1/2}. \quad \{(5.9)\}$$

д). Обязательно находим полную относительную ошибку измерений

$$\delta x_{\text{полн}} = (\Delta x_{\text{полн}} / \langle x \rangle) \cdot 100\%. \quad \{(5.10)\}$$

Она не должна превышать 5 % только в случае, если прямо измеренная величина  $\langle x \rangle$  далее не используется для косвенных измерений; если используется, то погрешность должна быть тем меньше, чем больше прямо измеренных величин в дальнейшем потребуются

Заметим, что в точных опытах число измерений стремятся увеличить (не всегда это возможно) до тех пор, пока случайная погрешность не станет хотя бы равной систематической.

Очевидно, и расчёт  $\langle x \rangle$  с точностью до сотых не имеет смысла, если  $\Delta x_{\text{полн}}$  составляет единицы; нужно  $\langle x \rangle$  округлить до одного порядка величины с погрешностью.

**ПРИМЕР 1.** Пусть измерения дальности полёта шарика из пружинного пистолета в лаборатории механики выполняются с помощью миллиметровой линейки. Прибор не имеет

класса точности, поэтому систематическая погрешность равна половине цены деления или 0,5 мм; следовательно, пытаться измерить десятые доли миллиметра не имеет смысла. Получились 4 значения: 160.5, 167.5, 170.5 и 162.5 мм. Тогда  $\langle x \rangle = (160.5+167.5+170.5+162.5)/4=165.25$  мм, что округляем до 165.3 мм. Абсолютные случайные погрешности отдельных измерений равны 4.8, -2.2, -5.2 и -2.8 мм; тогда  $|\langle \Delta x \rangle|=3.75$  мм, что округляем до 3.8 мм (при расчёте десятые доли ещё учитываются). Видно, что промахов, вероятнее всего, не было, и случайная погрешность существенно больше приборной, поэтому в дальнейшем будем учитывать лишь первую.

Находим среднеквадратичную погрешность  $\langle \sigma \rangle = \{[4.8^2 + 2.2^2 + 5.2^2 + 2.8^2] / 12\}^{1/2} = \{[23,04 + 4,84 + 27,04 + 7,84] / 12\}^{1/2} = (5,23)^{1/2} = 2,3$ . Задаём достоверность не менее 95 %. Тогда из таблицы 1 коэффициент Стьюдента  $t_{n,\alpha} = 3,18$  и  $\Delta x_{\alpha} = \langle \sigma \rangle \cdot t_{n,\alpha} = 7,3$  мм.

Тогда окончательно  $X_{\text{ист}} = 165.3 \pm 7,3$  мм при относительной погрешности  $\delta x = 4,4$  %. Цифра относительной погрешности «на пределе»: разброс значений длины довольно велик, а замеров выполнено всего 4.

**ПРИМЕР 2.** Определение напряжения сети делается вольтметром с пределом измерения 300 В, с числом делений на шкале 150 и классом точности 2.5; стрелка при 3-х замерах отклонялась на 109, 110 и 111 делений. Тогда при цене деления равна 2 В/деление показал 218, 220 и 222 В соответственно. Среднеарифметическая величина  $\langle U \rangle = 220$  В при среднеарифметической случайной погрешности 1,0 В, т.е. учесть надо лишь приборную погрешность, которая равна  $\Delta U = (2.5 \cdot 300) / 100 = 7,5$  В. Значит,  $U = 220 \text{ В} \pm 7,5 \text{ В}$ , а  $\delta U = 3,4\%$ . Заметим, что относительная погрешность, как и должно быть, превышает класс точности.

#### Определение погрешности косвенных измерений

Часто искомая величина А является известной функцией  $A = f(x,y,z,...)$  нескольких прямо измеряемых величин x, y, z... Естественно считать, что **наиболее близкое к истине значение А может быть найдено как**

$$A = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots). \quad \{(5.11)\}$$

Из приведённых выше данных следует, что погрешность каждой такой величины обычно невелика - самое большее единицы процентов, причём погрешности не зависят друг от друга. Тогда из дифференциального анализа следует, что ошибка косвенных измерений величины приближённо может быть найдена как дифференциал сложной функции

$$\Delta A_{\text{макс}} \approx \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots, \quad \{(5.12)\}$$

т.е. в простейшем случае просто суммируют все члены (при вычислении производной берут её модуль), находя **максимальную погрешность**. Напомню, что под  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  здесь понимаются **полные погрешности**, учитывающие и систематические, и случайные ошибки, т.е. найденные из (5.9). Кроме того, при вычислениях нужно помнить, что в формуле стоят знаки частной  $\partial f / \partial x$ , а не полной  $df/dx$  производной.

Более точной будет, конечно, **среднеквадратичная погрешность**

$$\Delta A = \{[(\partial f / \partial x)^2 \cdot (\Delta x)^2] + [(\partial f / \partial y)^2 \cdot (\Delta y)^2] + [(\partial f / \partial z)^2 \cdot (\Delta z)^2] + \dots\}^{1/2}. \quad \{(5.13)\}$$

Тогда окончательная формула примет вид

$$A_{\text{ист}} = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots) \pm \Delta A. \quad \{(5.14)\}$$

Обязательно вычисляем относительную ошибку измерений  $\delta A = (\Delta A / A) \cdot 100\%$ .

Она не должна, как правило, превышать 5 %. Если нужная точность не достигнута, то



придётся брать более точные приборы, менять методику измерений, увеличивать их число и т.д. и т.п.

Часто в итоговую формулу входят константы типа числа  $\pi$  или каких-то табличных значений. Здесь можно **принять абсолютную погрешность равной половине единицы младшего значащего разряда величины**. Так, если радиус Земли в таблице равен 6370 км, то погрешность берём 5 км; если число  $\pi$  взято как 3.14, то его ошибка 0.005.

**ПРИМЕР.** Для определения сопротивления катушки измерили ток через неё  $I$  при напряжении  $U$ , чтобы применить закон Ома  $R=U/I$  (метод вольтметра-амперметра). Для измерения тока использовали прибор с пределом измерения  $I_{\text{пред}}=150$  мА и классом точности  $k_I = 1,5$ , а напряжения -  $U_{\text{пред}}=3$  В и  $k_U = 2,5$ ; измеренные напряжение и ток составили  $U=2.64$  В и  $I=120$  мА, причём случайной погрешности не наблюдалось. Тогда  $R = 22,00$  Ома; абсолютная приборная погрешность  $\Delta I=(k_I \cdot I_{\text{пред}})/100\% = 2.25$  мА и  $\Delta U=(k_U \cdot U_{\text{пред}})/100\% = 75$  мВ. Величину  $\Delta R$  находим, для сравнения, сначала из (5.12), где  $A$  заменяется на  $R$ ,  $x$  на  $U$  и  $y$  на  $I$ . Член  $\partial R/\partial U=\partial(U/I)/\partial U=1/I$ ; аналогично  $\partial R/\partial I = \partial(U/I)/\partial I = -U/I^2$  (напомню, что знак "-" учитываться не будет). Значит, максимальная абсолютная погрешность  $\Delta R = \Delta U/I + U\Delta I/I^2 = 0,63 + 0,41 = 1.04$  (Ом). Итак, здесь  $R = 22,00 \pm 1.04$  Ома; относительная погрешность составит  $\delta R = 4.7\%$  (близко к пределу); вклад вольтметра и миллиамперметра в погрешность примерно одинаков. По формуле (5.13)  $\Delta R = [(\Delta U/I)^2 + (U\Delta I/I^2)^2]^{1/2} = (0,63^2 + 0,41^2)^{1/2} = 0,75$  Ома – заметно меньше.

Видно, что максимальная погрешность косвенных измерений превышает погрешность каждого прямого измерения и быстро увеличивается с ростом числа аргументов (средне-квадратичная в нашем случае составит 3.4% и растёт медленнее). Поэтому при точных косвенных измерениях стремятся использовать только прецизионные приборы.

### Лекция 6.

Основные темы. Элементы электрических схем. Электроизмерительные приборы. Шунт и добавочное сопротивление: способы их расчёта.

#### Элементы электрических цепей.

В лаборатории используется большое число электрических приборов и устройств - измерительных, вспомогательных, специальных и пр. – собираемых в электрические цепи. Для сборки этих цепей сначала на бумаге составляется принципиальная схема, т.е. студентам нужно знать условные обозначения в электрических схемах. Большинство этих условных обозначений изучаются всеми, кто закончил среднюю школу. Правда, часть обозначений со временем меняется, появляются новые элементы цепей и т.д., но основная часть неизменна много лет.

— Соединительный проводник. Его электрическое сопротивление в схеме считают равным нулю, т.е. и потенциал во всех точках проводника при протекании по нему тока будет одинаков.

⊕ Пересечение соединительных проводников в пространстве (в сложных схемах такое бывает) без электрического контакта.

⊙ Пересечение соединительных проводников в пространстве с электрическим контактом.

○ Гнездо для подключения соединительного провода. Для обеспечения надёжного электрического контакта провод должен иметь специальный наконечник с точной геометрией (пример – всем известная розетка бытовой электросети 220 В на два гнезда).

⊗ Универсальная соединительная клемма. Имеет и гнездо, и винтовой зажим, под которым оголённый (без изоляции) провод можно закрепить без специального наконечника.




Лампа накаливания (электрическая лампочка).




Гальванический элемент или аккумулятор; полярность в схемах может не указываться, т.к. длинная тонкая палочка всегда означает полюс «+», а короткая жирная всегда «-».




Батарея из трёх гальванических элементов или аккумуляторов, включенных последовательно (по единственно верной схеме; встречное включение соседних элементов неверно).

 Резистор – элемент цепи с постоянным электрическим сопротивлением известной величины). Часто вместо длинной фразы "Резистор сопротивлением 5 Ом" говорят просто "Сопротивление 5 Ом". Типовые резисторы имеют точность до 5 %, эталонные – гораздо выше. Важной характеристикой является и допустимая мощность (сила тока).

 Реостат (включается в цепь последовательно и служит для плавной регулировки силы тока в цепи путём изменения сопротивления). У него 2 основных характеристики (указаны на корпусе): максимальное сопротивление и допустимый ток. По правилам техники безопасности исходное положение ползунка (скользящего контакта) реостата – только на максимум сопротивления. Если используется 3-контактный типовой реостат (два контакта от концов обмотки и один от ползунка), то применяем простое **правило**: сопротивление между двумя выходными контактами должно быть максимальным. Для этого мысленно представляем путь тока и проверяем, какую часть обмотки реостата использует ползунок: должна использоваться вся обмотка. Нельзя забывать, что при уменьшении сопротивления реостата движением ползунка ток через оставшуюся часть витков растёт.

Пример. Можно ли реостат с параметрами 30 Ом и 10 А включать в розетку бытовой электросети 220 В?

По закону Ома сила тока при максимальном сопротивлении реостата будет  $220/30 \approx 7,3$  А, что меньше допустимых 10 А. Но если ползунок поставить посередине длины реостата, то сопротивление упадёт до 15 Ом и ток вырастет в 2 раза, до примерно 15 А – уже недопустимо. Если же оставить всего десятую часть витков обмотки реостата, то при сопротивлении 3 Ома пошёл бы ток около 73 А – должны немедленно сработать плавкие предохранители в схеме энергоснабжения лаборатории. Итак, любой реостат в неумелых руках – весьма опасное устройство.

 Переменное сопротивление. В лаборатории в качестве его обычно используется **магазин сопротивлений**, позволяющий менять сопротивление в широких пределах с высокой точностью. Так, магазин Р-33 при классе точности 0.2 позволяет шестью декадными (на 10 положений от 0 до 9) переключателями с множителями 0.1, 1, 10, 100, 1000 и 10000 изменить сопротивление от 0 до 99999.9 Ом через 0.1 Ом; показания всех переключателей надо СУММИРОВАТЬ. Для повышения точности и мощности (до 0.25 Вт на декаду!) помимо выхода на 99999.9 Ом есть ещё 2 выхода - до 0.9 и до 9.9 Ом.

Пример. Включены две младшие декады с общим сопротивлением 5,0 Ом. Какое наибольшее напряжение можно подать на магазин?

По формуле мощности  $P = U^2/R$  получаем, что при допустимой мощности двух декад 0,5 Вт и сопротивлении 5 Ом максимальное напряжение  $U_{\max} = (PR)^{1/2} = 0,5$  В. При этом пойдёт ток силой до 0,1 А.

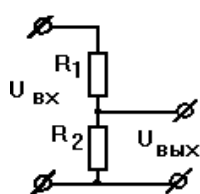
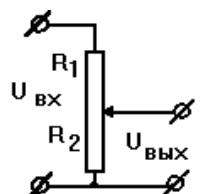
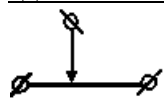


Схема делителя напряжения, позволяющая понять принцип работы потенциометра (см. ниже) и часто используемая в разных приборах. Пусть сопротивления резисторов равны. Тогда, по законам последовательного соединения, напряжение на входе схемы  $U_{\text{ВХ}}$  вдвое больше напряжения на выходе  $U_{\text{ВЫХ}}$ ; и чем меньше сопротивление  $R_2$  в сравнении с  $R_1$ , тем меньше выходное напряжение.



Трёхконтактный реостат, подключенный как потенциометр, т.е. устройство для регулировки напряжения. Действительно, если входное напряжение подать на всю обмотку реостата, а выходное снимать с части её, то на схеме  $U_{\text{ВЫХ}}$  минимально, когда ползунок занимает крайнее нижнее положение и сопротивление между выходными клеммами близко к нулю. Отсюда простое правило подключения потенциометра: подавая входное

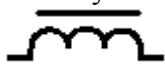
напряжение на всю обмотку, можно сделать выходное напряжение минимальным, если сделать минимальным выходное сопротивление.



Реохорд - реостат, где калиброванная проволока имеет вид струны, по которой перемещается скользящий контакт. Может применяться и как потенциометр.



Катушка индуктивности - устройство, обладающее заметной индуктивностью, т.е., в конечном счете, создающее достаточно сильный магнитный поток. При включении в цепь постоянного тока это может не проявляться, и катушки часто используют как обычные резисторы. Катушку с большим числом витков, имеющую большую индуктивность, зовут дросселем.



Катушка индуктивности с ферромагнитным (резко усиливающим магнитный поток) сердечником. Так, для увеличения индуктивности при том же сопротивлении постоянному току внутри дросселя часто помещают железный сердечник.



Трансформатор - две (и больше) катушки на замкнутом ферромагнитном сердечнике. Стандартное устройство для преобразования напряжения и силы переменного тока, широко применяемое на практике.



Ключ (выключатель).



Переключатель с правильным

подключением соединительных проводников.

Замечу, что переключатель можно применять и как ключ, если не использовать один из крайних контактов. Стандартной ошибкой начинающих является при этом включение проводов на крайние контакты.



Переключатель с неправильным подключением проводов.

Сдвоенный переключатель - это два переключателя, связанные механически (но не обязательно электрически!) на одном основании, что позволяет не только быстро подключать к источнику питания разные нагрузки (рис. 1а), но и быстро менять направление постоянного тока в нагрузке за счёт подключения крайних клемм "крест-накрест" (рис. 1б). Часто это подключение делают снизу основания, что незаметно, поэтому нужно быть внимательным, если в схеме есть такие устройства.

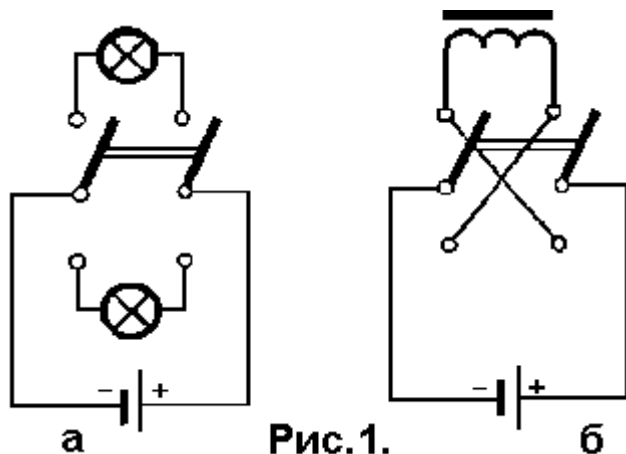


Рис. 1.



Конденсатор - устройство для накопления электрических зарядов, характеризуемое ёмкостью и рабочим напряжением.



Конденсатор переменной ёмкости; в лаборатории применяют магазины ёмкостей (батареи конденсаторов), где нужная ёмкость набирается подключением нескольких конденсаторов, например, с помощью клавишных выключателей; при нажатии клавиш открываются цифры ёмкости (в мкФ), которые нужно просуммировать.



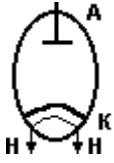
Общее обозначение электроизмерительных приборов. Если надо уточнить назначение прибора, в кружке должна быть поясняющая надпись - например, показан



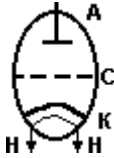
миллиамперметр.



Плавкий предохранитель. Основная его характеристика – допустимая сила тока.



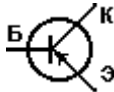
Вакуумный диод (двух электродная лампа). К – катод, А – антикатод (анод), НН – нить накала.



Вакуумный триод (трёх электродная лампа). К – катод, А – анод, С – сетка, НН – нить накала.



Полупроводниковый диод. Стрелка показывает направление пропускания тока.



Полупроводниковый триод (транзистор). Э – эмиттер, К – коллектор, Б – база.



Электродинамический громкоговоритель (динамик).



Микрофон



Общее обозначение какого-то сложного прибора – электронного осциллографа, звукового генератора, выпрямителя и т.п. Назначение устройства должна пояснять надпись внутри прямоугольника.



Например, генератор звуковой школьный (ГЗШ).



Выпрямитель типа В-24.



Заземление (соединение с землёй с целью получения, например, условного нулевого потенциала, для безопасности и др.)



Старое обозначение заземления.

**Для сборки цепи без ошибок полезно запомнить простое правило: на лабораторном**

столе элементы цепи должны размещаться точно в таком же порядке, как в принципиальной схеме.

### Электроизмерительные приборы

Существует значительное число приборов для измерения электрических величин - силы тока (**амперметры**), напряжения (**вольтметры**), сопротивления (**омметры**), мощности (**ваттметры**) и т.д. К основному названию всех приборов при изменении их чувствительности добавляются названия десятичных приставок Мега (М)  $10^6$ , кило (к)  $10^3$ , милли (м)  $10^{-3}$ , микро (мк)  $10^{-6}$ , нано (н)  $10^{-9}$  и пико (п)  $10^{-12}$  - например, микроамперметр или Мегаомметр (сокращённо Мегометр).

Следует отметить, что подавляющее большинство электроизмерительных приборов фактически реагируют только на силу тока, но на заводе-изготовителе по известным характеристикам прибора (чувствительности, сопротивлению и пр.) пересчитывают шкалу (чаще всего с помощью законов Ома) и сразу указывают нужные единицы, например, напряжение или сопротивление вместо силы тока. Напомню, что омметр неработоспособен без внешней батареи, внутреннее сопротивление которой со временем меняется, поэтому **перед измерениями здесь необходимо замкнуть провода и специальным регулятором установить стрелку "на ноль"** (в омметрах это положение фактически соответствует максимальному току). При разряженной батарее добиться нуля не удастся; этого недостатка практически лишены мостиковые приборы для измерения сопротивления (например, мост Уитстона), изучаемые в лаборатории электричества и магнетизма. Приборы для измерения слабых токов в несколько микроампер, т.е. с высокой чувствительностью, называют **ГАЛЬВАНОМЕТРАМИ**; обычно они отличаются и высокой точностью. Гальванометры особой конструкции, отклонение стрелки которых пропорционально прошедшему по цепи заряду, называют баллистическими гальванометрами.

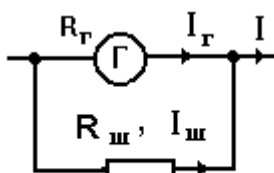


Рис.2.

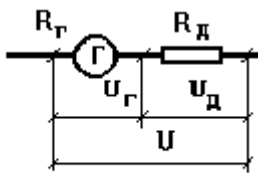


Рис.3.

### Шунт и добавочное сопротивление: способы их расчёта.

Сильные токи можно измерить с помощью гальванометра, если параллельно ему подклю-

чить высокоточный резистор (стандартные резисторы имеют относительную погрешность 5%) с малым сопротивлением - **ШУНТ**. Тогда по законам параллельного соединения резисторов основной ток  $I_{Ш}$  пойдет по шунту (рис. 2), причём общий ток  $I = I_{Г} + I_{Ш}$  и отношение токов гальванометра и шунта обратно их сопротивлениям  $I_{Г}/I_{Ш} = R_{Ш}/R_{Г}$ . Пусть ток  $I$ , который нужно измерить данным гальванометром, в  $n$  раз больше его предельного тока  $I_{Г}$ , т. е.  $n = I/I_{Г}$ . Тогда  $R_{Ш} = R_{Г}(I_{Г}/I_{Ш}) = R_{Г}[I_{Г}/(I - I_{Г})] = R_{Г}/(n - 1)$ . Это и есть **формула шунта**:

$$R_{Ш} = R_{Г}/(n - 1) . \quad \{(7.1)\}$$

Замечу, что амперметр, включаемый всегда в разрыв цепи, вносит своим присутствием изменение тока тем более сильное, чем выше его сопротивление, поэтому сопротивление амперметров стремятся сделать как можно меньшим. Шунт позволяет удовлетворить и это требование.

При необходимости измерения больших напряжений последовательно с гальванометром включают **ДОБАВОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ**. Пусть сопротивление гальванометра  $R_{Г}$  (рис. 3) и его предельное напряжение  $U_{Г}$ , а нужно измерить большее напряжение  $U$ , причём  $n' = U/U_{Г}$ . Тогда включение добавочного сопротивления  $R_{Д}$  приведёт к перераспределению напряжений: по законам последовательного соединения резисторов

$U=U_{\Gamma}+U_{\text{д}}$  и большее напряжение падает на большем сопротивлении, т.е.  $U_{\text{д}}/U_{\Gamma}=R_{\text{д}}/R_{\Gamma}$ . Отсюда  $R_{\text{д}} = R_{\Gamma}(U_{\text{д}}/U_{\Gamma}) = R_{\Gamma}[(U-U_{\Gamma})/U_{\Gamma}] = R_{\Gamma}(n'-1)$ . Итак, **формула добавочного сопротивления** -

$$R_{\text{д}} = R_{\Gamma}(n'-1). \quad \{(7.2)\}$$

Вольтметр, включаемый параллельно какому-то участку цепи, за счёт ответвляющегося в него измерительного тока искажает исходное напряжение тем сильнее, чем меньше сопротивление прибора. Поэтому стремятся сопротивление вольтметров сделать как можно больше; добавочные сопротивления способствуют выполнению данного условия.

Заметим, что формула (7.2) годится при расчёте любого добавочного сопротивления, когда нужно погасить часть избыточного напряжения. Пусть, например, электрическую лампочку мощностью  $P=100$  Вт с рабочим напряжением  $U_{\text{л}}=220$  В нужно включить под напряжение  $U=380$  В. Тогда по формуле мощности  $P=U^2/R$  найдем сопротивление лампочки  $R_{\text{л}}=484$  Ом (напряжение  $U_{\text{л}}$  неизменно, поэтому видно, что в сети меньшее сопротивление имеют лампочки большей мощности), а по закону Ома - её рабочий ток  $I_{\text{л}}=U_{\text{л}}/R_{\text{л}}=0.45$  А. Отношение  $n'=U/U_{\text{л}}$  составит примерно 1.7. Тогда из (7.2)  $R_{\text{д}}$  будет около 340 Ом; нужно не забыть, что по нему пойдет рабочий ток  $I_{\text{д}}=I_{\text{л}}=0.45$  А (последовательное соединение!), выделяя мощность  $P_{\text{д}}=U_{\text{д}}I_{\text{д}}$  порядка 160 Вт - многовато для потерь, да и тепловыделение будет очень приличное. Вот почему в сетях переменного тока для изменения напряжения стремятся использовать трансформаторы, в которых потери очень невелики. А вот в сетях постоянного тока с большими потерями при гашении части напряжения приходится мириться.

#### Лекция 7.

**Основные темы.** Многопредельные электроизмерительные приборы. Авометры. Системы электроизмерительных приборов: принцип действия, устройство, особенности применения. Некоторые обозначения на шкалах приборов

**Многопредельные электроизмерительные приборы. Авометры.**

Видно, что из чувствительного гальванометра легко сделать прибор для измерения больших токов или напряжений (или малых сопротивлений), а вот обратное вообще невозможно. Поэтому на практике используют **многопредельные приборы** - гальванометры с целым набором шунтов и добавочных сопротивлений, подключаемых по очереди и позволяющих изменять предел измерения; шкал может быть несколько, но обычно используется одна. Если в приборе есть ещё и внутренняя батарейка, он способен измерить сопротивление. Такой универсальный прибор для измерения токов, напряжений и сопротивлений называют АмперВольтОмМЕТРОМ или **АВОМЕТРОМ** (в ряде моделей можно измерять также ёмкости конденсаторов). Очевидно, что здесь приходится использовать несколько переключателей и шкал.

В лаборатории используются два типа авометров: АВО-5 (рис.4) и АВО-63 (рис.5). В обоих измерителем служит гальванометр; оба содержат по три основных шкалы (в АВО-5 есть ещё шкала децибел, которая нами не используется); оба авометра имеют переключатель вида работ 1 и потенциометр установки нуля омметра 2. Из рисунков видно, что в остальном вид и возможности авометров существенно разные.

В частности, АВО-5 имеет значительно более широкий диапазон измеряемых величин: в крышке прибора поставляются специальные высоковольтные наконечники, позволяющие измерять напряжение до 6000 В; предусмотрена возможность установки как одной плоской батарейки на 4.5 В (работает в омметре на диапазонах  $\Omega$  и  $\Omega \times 100$ ), так и ещё трёх таких батареек (в диапазоне  $\Omega \times 10000$ ); пределы измерения постоянного тока - от 60 мкА до 12 А. Выбор измеряемой величины и

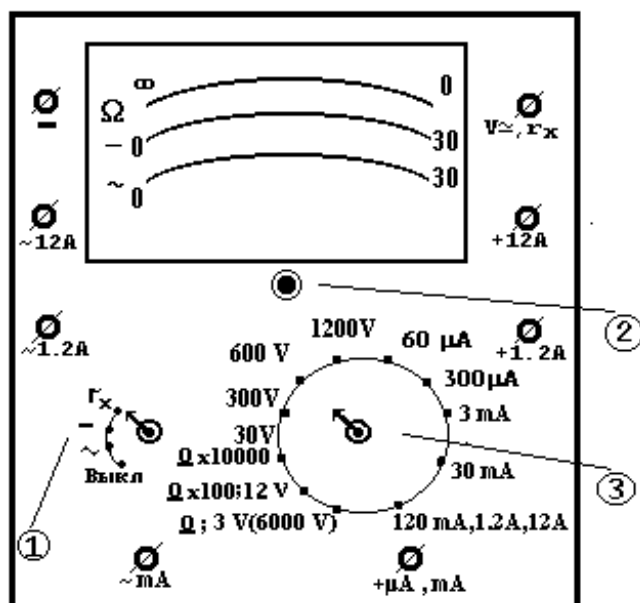


Рис.4. Авометр АВО-5.

предела измерений осуществляется в три этапа: сначала переключателем вида работ 1 (на четыре положения, из которых рабочих три - омметра "ГХ", постоянных величин "-" и переменных "~" величин) выбираем вид работ; затем переключателем предела измерений 3 выбираем нужный диапазон; наконец, выбираем нужные клеммы. Единственной универсальной является клемма "-" в левом верхнем углу (её называют "общий минус"): один проводник всегда подключается сюда. При измерении напряжений и сопротивлений второй проводник подключаем к правой верхней клемме; все остальные клеммы предназначены для измерения токов (постоянных - с правой стороны, и переменных - с левой). Наименьший предел измерения для переменного тока 3 мА; пределы 300 и 60 мкА - только для постоянного тока. В некоторых моделях прибора в ручке потенциометра 2 имеется кнопка, нажатие которой замыкает клеммы омметра и позволяет быстро установить его в нулевое положение перед измерением сопротивления.

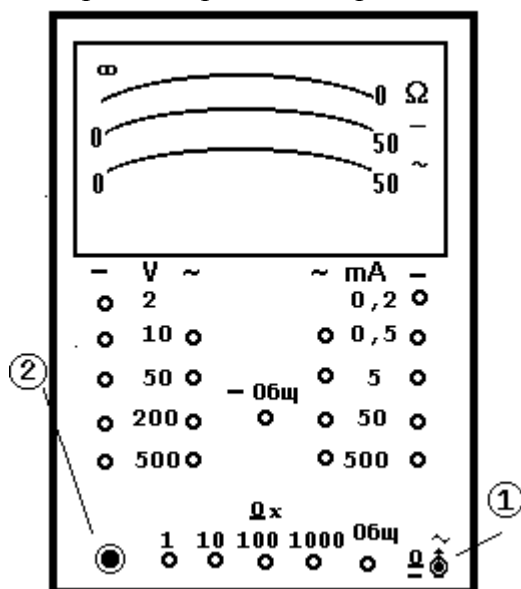


Рис. 5. Авометр АВО-63.

В приборе АВО-63 есть лишь переключатель вида работ 1 на два положения - одно для постоянных величин и омметра, другое - для переменных величин. Предел измерения можно изменить путём выбора гнезд, причём общих гнезд два - одно для омметра, другое для измерения токов и напряжений ("общий минус"). На шкалах переменных и постоянных величин по 50 делений; для удобства измерений нанесено, однако, три ряда цифр (что

часто только запутывает начинающего).

Системы электроизмерительных приборов: принцип действия, устройство, особенности применения

Необходимость нескольких шкал часто бывает связана с ещё одной причиной: большинство точных гальванометров имеют **магнитоэлектрическую систему**, способную измерять лишь постоянные токи.

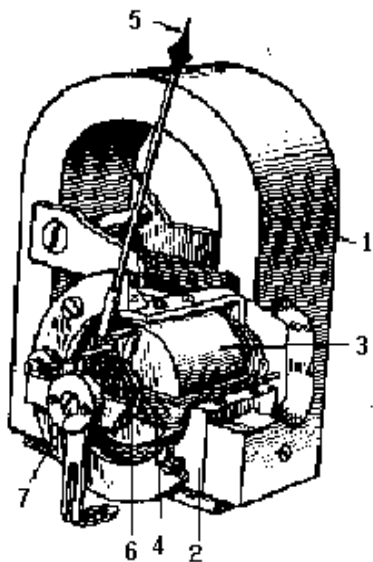


Рис.6.

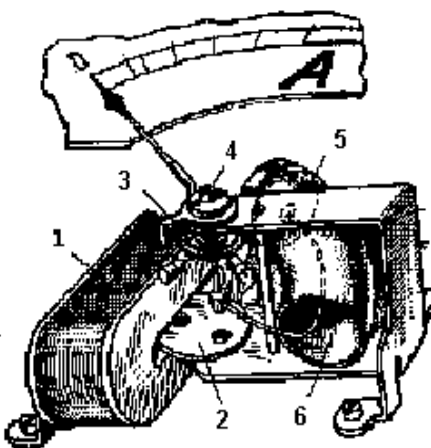


Рис.7.

Действительно, прибор такой системы (рис.6) использует свойство рамки с током 4 поворачиваться под действием сил Ампера в магнитном поле сильного постоянного магнита 1 до тех пор, пока плоскость рамки не станет перпендикулярной полю. В приборе повороту рамки препятствуют две высокоточные спиральные пружинки 6, по которым подводится ток, поэтому отклонение стрелки 5, закрепленной на одной оси 7 с рамкой, будет пропорциональным току в ней; без пружин измерение невозможно. В итоге шкала прибора линейна (цена деления одинакова в любом месте шкалы), что удобно для измерений, достаточно высоки чувствительность и точность при не слишком сложной конструкции. В частности, железные полюсные наконечники 2 и цилиндр 3, на котором находится рамка, не только концентрируют и резко усиливают поля магнита и рамки, увеличивая их взаимодействие, но и экранируют от внешних магнитных полей; корректор позволяет поворотом одной из пружин установить стрелку хоть на середину шкалы; алюминиевый каркас рамки за счёт возникающих в нём токов Фуко служит успокоителем (демпфером) колебаний, и стрелка быстро устанавливается в рабочее положение. Вместе с тем, рамка боится сильных токов; кроме того, при смене направления тока изменяется и направление поворота стрелки, т.е. для измерения переменных токов прибор не пригоден. Поэтому в универсальных приборах с гальванометрами магнитоэлектрической системы приходится сначала переменный ток выпрямлять с помощью, например, полупроводникового диода. Но он как вносит собственное сопротивление, так и является нелинейным устройством (да ещё с ограниченным рабочим интервалом частот), поэтому отдельную шкалу для переменного тока использовать приходится обязательно. Иногда для напряжений также имеется отдельная шкала, так что в ампервольтметре делают по 2 шкалы для переменных и постоянных величин; в авометре, следовательно, шкал в таком случае будет уже 5. Но даже если для токов и напряжений использовать одну и ту же шкалу, в авометре должно быть как минимум 3 шкалы - переменных величин, постоянных величин и сопротивления.

Приборы электромагнитной системы (рис. 7) состоят из многовитковой катушки 1 с прорезью, куда при пропускании тока втягивается железный сердечник 2, эксцентрично закрепленный на одной оси 4 со стрелкой. Высокоточная спиральная пружина 3 создаёт противодействующий момент, пропорциональный углу поворота. Втягивающий момент,



однако, пропорционален и току в катушке, и намагниченности сердечника, также пропорциональной магнитному полю катушки (т.е. току в ней); в итоге зависимость вытягивающего момента от тока квадратичная, т.е. и слабые токи прибор чувствует плохо, и шкала получается неравномерной. Демпфирующий поршень 5, также соединённый со стрелкой, при движении внутри цилиндра 6 испытывает сопротивление воздуха и быстро успокаивает колебания стрелки. Существенным преимуществом прибора является его работоспособность как на постоянном, так и на переменном токе: при смене направления тока в катушке в сердечнике направление намагниченности также меняется, и направление вытягивающего момента сохраняется; не боится он и перегрузок по току, прочен, прост в устройстве. Вместе с тем, меньшая точность, чем в магнитоэлектрической системе, нелинейность шкалы и чувствительность ко внешним магнитным полям являются недостатками прибора, не позволяющими использовать его в качестве гальванометра; обычно приборы такой системы служат для измерения только переменных токов и напряжений сравнительно больших величин.

Приборы электродинамической системы (рис. 8) состоят из двухсекционной неподвижной катушки 1, внутри которой может поворачиваться подвижная катушка 2, закрепленная на одной оси со стрелкой 3 и демпфером (не показан). Спиральная пружина 4 создаёт противодействующий момент. При пропускании тока через катушки их магнитные поля взаимодействуют (неподвижная катушка играет роль постоянного магнита в приборах магнитоэлектрической системы). Катушки можно соединить параллельно (амперметр), последовательно (вольтметр) и не соединять вообще, а подключить одну (с малым числом витков из толстого провода) в разрыв цепи, вторую же (с большим числом витков тонкого провода) - параллельно. Тогда вращающий момент оказывается пропорциональным мощности, и прибор можно применять как ваттметр с равномерной шкалой; при измерении напряжений и токов шкала неравномерная. Существенное достоинство прибора - его работоспособность на переменном и постоянном токах; точность достаточно высока. Вместе с тем, конструкция сравнительно сложна и не выдерживает механических или электрических перегрузок; шкала амперметров и вольтметров этой системы, напомним, неравномерна.

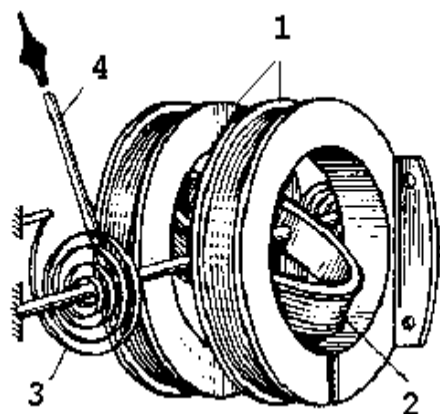
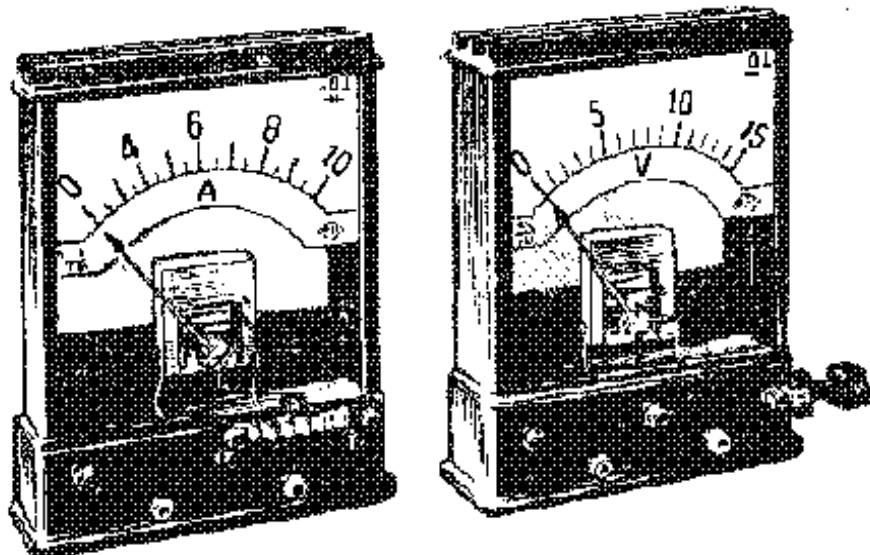


Рис.8. Прибор электродинамической системы: 1 - неподвижная катушка, 2 - подвижная катушка, 3 - спиральная пружина, 4 - стрелка.

Главным отличием приборов ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ является встроенный электронный усилитель к магнитоэлектрическому гальванометру, обеспечивающий как высокую чувствительность, так и соответствующее входное сопротивление (большое для вольтметров и малое для амперметров); в ЦИФРОВЫХ ПРИБОРАХ этой системы индикатором служит цифровое табло, а не стрелочный прибор. Существует значительное количество других систем приборов - индукционная, тепловая, электростатическая и пр. - которые мы не рассматриваем.

Широко применяются в лаборатории два прибора магнитоэлектрической системы - демонстрационные амперметр и вольтметр (рис. 9); они могут использоваться и как гальванометры. Каждый прибор имеет по три вставляемых сверху сменных шкалы (гальванометра "Г" с нулем посередине и делениями 5-0-5, переменной "~" и постоянной "-" вели-

чин; последние две шкалы двухсторонние), пять клемм (две красные для гальванометра с плюсом справа, три клеммы для переменной и постоянной величин с общей клеммой по середине). На задней поверхности находятся корректор нуля и ящичек с добавочными сопротивлениями для вольтметра и шунтами для амперметра. Гальванометр амперметра имеет собственное сопротивление порядка 385 Ом, и при токе 0,25 мА стрелка отклоняется на все 5 делений, т.е. чувствительность



**Рис. 9. Демонстрационные амперметр и вольтметр.**

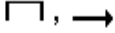




составляет около 50 мкА/дел (точные данные конкретного прибора указаны на шкале гальванометра); с шунтами (используются одни и те же) можно измерять переменный и постоянный токи до 3 А и до 10 А. Гальванометр вольтметра имеет собственное сопротивление порядка 2,3 Ом, и при напряжении 10 мВ от среднего положения стрелка отклоняется до конца шкалы, т.е. чувствительность составляет 2 мВ/дел. С добавочными сопротивлениями можно измерить постоянные напряжения до 5 или 15 В и переменные - до 15 или 250 В; имеются 4 разных добавочных сопротивления.

#### **Некоторые обозначения на шкалах приборов**

- A, V, Ω - амперметр, вольтметр, омметр;
- mV, mA - милливольтметр, миллиамперметр;
- μV, μA - микровольтметр, микроамперметр;
- kV, kΩ - киловольтметр, килоомметр;
- MΩ - мегаомметр (мегомметр);
- W - ваттметр (прибор для измерения электрической мощности);
- 0.2, 1.5 и пр. - класс точности прибора;
- В - прибор для работы в полевых условиях;
- Б - прибор для работы в не отапливаемых помещениях (лабораторные приборы для работы в сухом отапливаемом помещении особого обозначения на шкале не имеют);



- прибор магнитоэлектрической системы;
- прибор электромагнитной системы;
- прибор электродинамической системы;

-  - рабочее положение прибора горизонтально ;  
 - рабочее положение прибора вертикально ;  
 - прибор переменного тока ;  
 - прибор постоянного тока ;  
 - прибор измеряет и переменный, и постоянный токи .

### Лекция 8.

Основные темы. Источники питания: принцип действия, устройство, особенности применения. Специальные приборы. Назначение и блок-схема электронного осциллографа.

Источники питания: принцип действия, устройство, особенности применения.

В лаборатории используются всего два вида источников питания - а) **химические (аккумуляторы и гальванические элементы)** и б) **сеть переменного тока** частотой 50 Гц с действующим напряжением 220 В. Правда, во втором случае характеристики напряжения можно менять с помощью различных устройств – выпрямителей, регуляторов и пр.

а1) **Гальванический элемент** служит только источником постоянного тока с ограниченными ЭДС (порядка 1.5-2 В на элемент, поэтому для роста общей ЭДС их часто соединяют последовательно в батареи) и мощностью, определяемой внутренним сопротивлением. Все так называемые сухие элементы (их представители известны в быту как круглые и плоские батарейки для фонариков и бытовых приборов, хотя батареей фактически является лишь плоская, составленная из трёх круглых элементов) - это современные аналоги элементов Даниеля и Лекланше, разработанных ещё в 19 веке. Они имеют довольно большое внутреннее сопротивление - до единиц Ом; следовательно, полезная их мощность составляет лишь единицы Ватт на элемент. Ограничен и срок службы вследствие саморазряда. Вместе с тем, в измерительных целях, где не требуются большие токи и напряжения, данные элементы очень удобны; именно они обеспечивают работу омметра в авометрах.

а2) Главное отличие **аккумуляторов** от гальванических элементов - возможность перезарядки. Издавна существуют 2 основных типа аккумуляторов - щелочные и кислотные (сейчас появились и другие типы). При близких ЭДС (около 2 В) они отличаются внутренним сопротивлением, которое у щелочных сравнительно велико (единицы Ом), а у кислотных может быть сделано очень малым (миллиОмы). В итоге вторые обеспечивают очень большие токи (сотни Ампер) и применяются, например, в качестве стартерных источников автомобилей. В учебных лабораториях (особенно в школе) используются только щелочные аккумуляторы, которые не боятся коротких замыканий; кислотные в такой ситуации могут просто взорваться и облить окружающих кислотой.

Замечу, что запас энергии химических источников тока принято звать **ёмкостью**. Она измеряется несистемной единицей - Ампер-часами (А-час). Ёмкость зависит от сопротивления нагрузки R и показывает, какой заряд можно пропустить по цепи с помощью данного источника при определённом стандартном R. Очевидно, 1 А-час = 3600 Кл. Следовательно, батарейка для карманного фонарика ёмкостью 0,5 А-часа как бы "содержит" гигантский заряд 1700 Кл.

б) Сеть переменного тока обеспечивает питание только гармонически меняющимся переменным током с фиксированной частотой 50 Гц при действующем напряжении электрического поля 220 В. А вот мощность здесь можно получить большую: стандартные плавкие предохранители рассчитаны на ток до 10 А, т.е. на мощность до 2,2 кВт. Для многих лабораторных работ, однако, нужны источники с другими характеристиками - высоковольтные постоянного тока, постоянного тока большой мощности, переменного тока с другими частотой или под другим напряжением и т.д. Поэтому в лаборатории широко используются **выпрямители, регуляторы напряжения и звуковые генераторы**, позволяющие изменить вид тока и его частоту или величину напряжения.

Замечу, что все учебные приборы с металлическими корпусами обязательно имеют ручки для переноски и органы управления, выполненные из диэлектрика и предохраняющие от поражения электрическим током при попадании напряжения на корпус (например, из-

за истирания изоляции сетевых проводов). Только изолированных частей и можно касаться, когда прибор находится под напряжением.

б1) **Выпрямители** простейшей конструкции преобразуют с помощью вентильных устройств (вакуумных и полупроводниковых диодов, селеновых столбиков и т.п.) переменное напряжение сети в однополупериодное или двухполупериодное пульсирующее. Замечу, что селеновые выпрямители менее чувствительны к перегрузкам, чем с полупроводниковыми диодами: если после пробоя столбика (слышен громкий щелчок и ощущается характерный запах селена) быстро снизить нагрузку, то выпрямитель сохранит работоспособность. Для устройства с полупроводниковыми диодами никаких признаков перегрузки нет: выпрямитель просто перестаёт работать. В более сложных устройствах предусмотрена плавная или ступенчатая регулировка выходного напряжения, а в качественных - ещё и преобразование пульсирующего напряжения в почти постоянное с помощью специальных индуктивно-конденсаторных фильтров. В самых качественных выпрямителях выполняется электронная стабилизация выходного напряжения; но небольшие пульсации напряжения здесь всё равно есть, и единственными источниками действительно постоянного тока являются только химические.

Простейший двухполупериодный выпрямитель селеновый школьный ВСШ-6 даёт нерегулируемое выходное напряжение 6 В при токе до 2 А. Фильтра в нём нет, т.е. выходное напряжение пульсирующее.

Двухполупериодный выпрямитель селеновый типа ВС 4-12 позволяет получить регулируемое ступеньками по 2 В пульсирующее выходное напряжение в диапазоне 4-12 В при токе до 1,5 А.

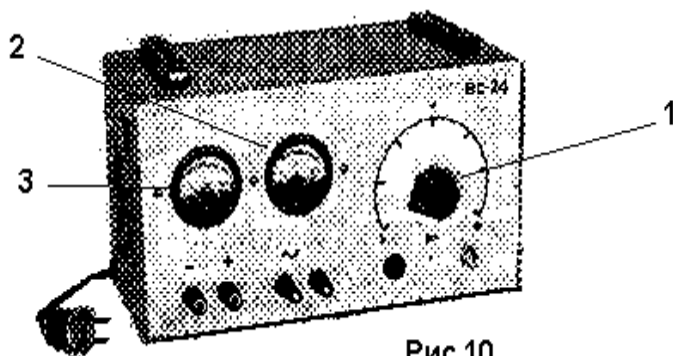


Рис.10.

Двухполупериодный выпрямитель селеновый ВС-24 (есть и полупроводниковый вариант В-24) позволяет получить плавно регулируемые пульсирующее (в диапазоне 0-24 В) и переменное (0-30) напряжения. Выпрямитель на лицевой панели содержит (рис.10) ручку регулятора напряжения 1 (цена деления

шкалы - примерно 5 В), вольтметр 2 и амперметр 3 (только постоянного тока!), выходные клеммы переменного "~" и постоянного ("- и "+) напряжений, индикаторную лампочку и выключатель питания. Предельный ток - 10 А.

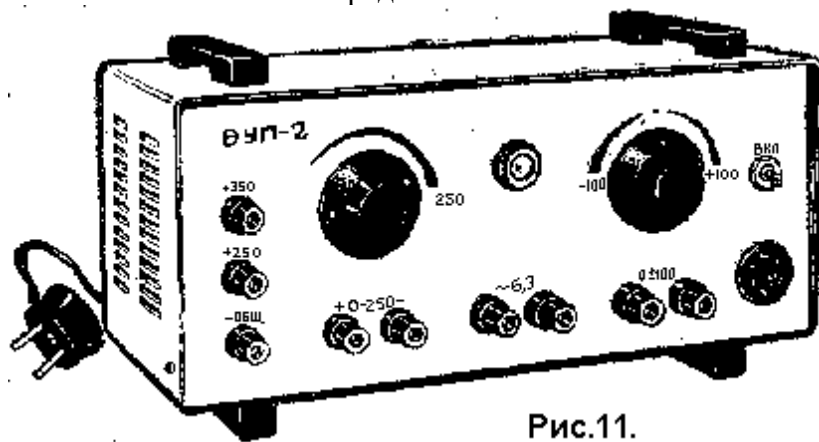


Рис.11.

Двухполупериодный выпрямитель универсальный полупроводниковый ВУП-2 (рис.11) имеет 2 выхода с регулируемым напряжением и 3 - с нерегулируемым. Регулируемый выход постоянного напряжения 0-250 В имеет индуктивно-конденсаторный фильтр и обеспечивает ток до 50 мА. Регулируемый выход постоянного биполярного напряжения  $0 \pm 100$  В имеет конденсатор-

ный фильтр и обеспечивает ток до 10 мА. Нерегулируемые выходы имеют такие характеристики: +250 - те же, что у регулируемого 0-250 В; +350 - не фильтрованное пульсирующее напряжение при токе до 220 мА; выход ~6.3 В с током до 3 А нужен для питания нитей накала электронных ламп. Наконец, на передней панели имеется разъём специальной формы для питания счётчика ионизирующих частиц. Отмечу два обстоятельства: во-первых, выходы +350 В и  $0\pm 100$  В можно соединять последовательно, позволяя регулировать напряжение от 250 до 450 В; во-вторых, регулятор напряжения биполярного выхода  $0\pm 100$  В имеет нулевое положение в среднем положении ручки потенциометра, а не в положении поворота ручки до отказа против часовой стрелки, стандартном для всех потенциометров.

Замечу, что существует как более старая модель этого выпрямителя под названием ВУП-1 (с теми же характеристиками, но корпусом другой формы), так и более современная ВУП-2М, позволяющая получить, например, регулируемое выпрямленное напряжение только до 150 В.

б2) **Регуляторы напряжения** - устройства, позволяющие менять только амплитуду переменного напряжения. Широко используют лабораторный автотрансформатор ЛАТР (рис.12) и регулятор напряжения школьный РНШ - тот же ЛАТР, но в металлическом корпусе с вольтметром (рис.13). С их помощью можно менять напряжение в диапазоне от 0 до 250 В при токе до 4,5 А. Внимание! Через каждые 45 минут работы нужно на 15 минут отключать приборы для охлаждения.



Рис.12.

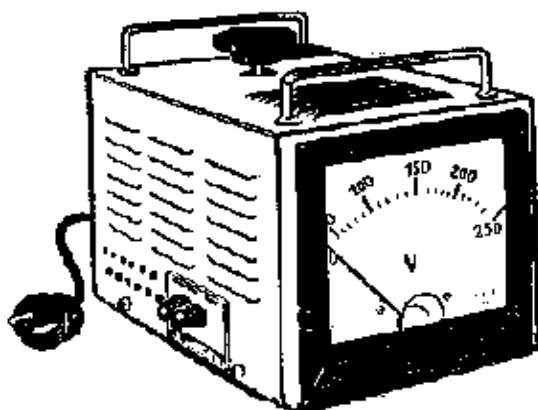


Рис.13.

Замечу, что простейшими регуляторами напряжения служат рассмотренные выше резисторный делитель напряжения и потенциометр.

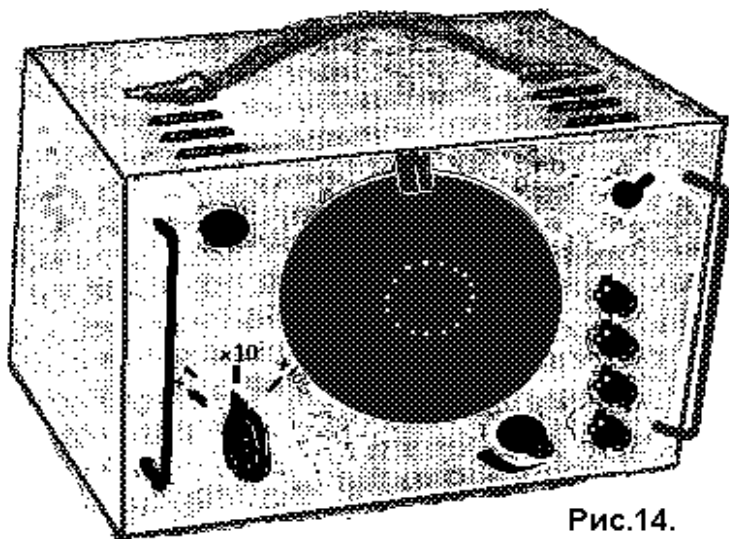


Рис.14.

б3) **Звуковой генератор** - устройство, позволяющее получить переменное синусоидальное напряжение регулируемой частоты и амплитуды. Генератор звуковой школьный ГЗШ (рис.14) преобразует напряжение сети в напряжение другой частоты и амплитуды, но той же формы. Рабочий диапазон частот - от 20 Гц до 20 кГц - разбит на три поддиапазона (переключатель-множитель с указаниями "x1", "x10" и "x100"), в пределах каждого из которых возможна плавная регулировка частоты по круговой шкале от 20 до 200. Предусмотрены три значения выходного сопротивления: "5 Ом", "600 Ом" и "5000 Ом", позволяющие повысить полезную мощность

в пределах каждого из которых возможна плавная регулировка частоты по круговой шкале от 20 до 200. Предусмотрены три значения выходного сопротивления: "5 Ом", "600 Ом" и "5000 Ом", позволяющие повысить полезную мощность

генератора в случае разной нагрузки (напомню, что полезная мощность максимальна, если внутреннее сопротивление источника питания и сопротивление нагрузки совпадают). Плавно изменять величину выходного напряжения позволяет ручка "Усиление". Генератор рассчитан на мощность до 5 Вт. Внимание! Значит, на выходе "5000 Ом" наибольшее напряжение может достигать 250 В!

В новых моделях ГЗШ есть и встроенный усилитель низкой частоты; тогда добавляются 2 клеммы входа усилителя с надписью «УНЧ», а у переключателя-множителя есть 4-е положение – «УНЧ». Выходное напряжение можно менять и ступенчато, выбирая выходы с разным внутренним сопротивлением, и плавно ручкой "Усиление".

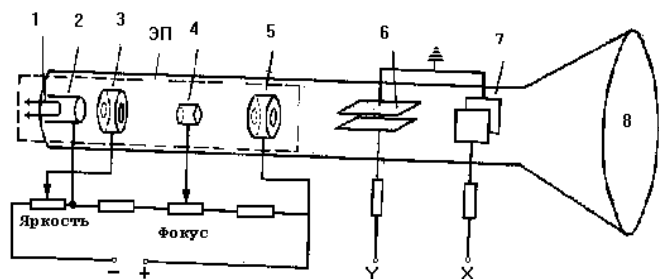
### Специальные приборы

В лаборатории используется ряд специальных приборов **электронный и цифровой осциллографы**, электронные вольтметры, мост Уитстона и др. В ходе данной практики мы рассмотрим лишь осциллографы; остальные приборы будут изучаться в работах курса физики.

Назначение и блок-схема электронного осциллографа.

**Электронный осциллограф** - прибор для наблюдения быстропротекающих процессов – любых, которые можно преобразовать в напряжение. Процессы, как правило, должны периодически повторяться во времени. Существуют и так называемые запоминающие осциллографы, позволяющие увидеть не повторяющиеся импульсные процессы; но к стандартному лабораторному оборудованию они не относятся и нами не изучаются. В последнее время необходимость в них отпала и ввиду широкого распространения цифровых осциллографов на базе ПК.

Типовой осциллограф включает несколько блоков и узлов, электрически связанных между собой. Основным блоком (узлом) любого электронного осциллографа является **электронно-лучевая трубка ЭЛТ** (рис.15) - вакуумированное устройство для создания узкого пучка быстрых электронов и управления его движением. Источником электронов



**Рис.15.**

является металлический катод 2, нагреваемый до температуры начала термоэлектронной эмиссии нитью накала 1, подключаемой к источнику накального переменного тока стандартным напряжением 6,3 В. Изменять количество электронов в пучке позволяет управляющий электрод 3, имеющий отрицательный относительно катода потенциал регулируемой потенциометром "Яркость" величины. Фокусирующий электрод 4 (его называют также первым анодом) имеет положительный относительно катода потенциал регулируемой потенциометром "Фокус" величины, что позволяет не только разгонять электроны, но и менять диаметр пучка. Второй, разгоняющий анод 5 имеет высокий потенциал (тысячи Вольт) и разгоняет электроны до высоких скоростей, поэтому при ударе их о покрытый специальным люминофором экран 8 в месте удара возникает свечение. Вертикально отклоняющие пластины 6 и горизонтально отклоняющие 7 управляют положением точки удара на экране при подаче на них напряжения; чем выше, например, положительный потенциал верхней из пластин 6, тем сильнее сдвинется луч по вертикали вверх. Принято вертикально отклоняющие пластины называть пластинами "Y", а горизонтально отклоняющие - пластинами "X". Заметим, что все электроды, кроме пластин, образуют электронную пушку ЭП (обведена на рисунке пунктиром); реально она занимает значительно

меньшую часть трубки.

**Блок питания** преобразует с помощью трансформатора, выпрямительных устройств и фильтров переменное сетевое напряжение в переменные и постоянные напряжения разной величины, необходимые для питания всех остальных блоков. **Генератор развёртки** служит источником пилообразного напряжения регулируемой частоты и величины; его сигнал подается только на пластины **X** через **усилитель горизонтального отклонения (усилитель X)**. Исследуемый сигнал подается только на пластины **Y**, причём его амплитуду можно как ступенчато уменьшить с помощью резисторного делителя напряжения, так и плавно увеличить **усилителем вертикального отклонения (усилитель Y)**. **Блок синхронизации** обеспечивает автоматическую подстройку частоты генератора развёртки к частоте исследуемого сигнала; синхронизация обеспечивает устойчивость изображения на экране, но работает лишь при малой разнице этих частот, т.е. основную часть подбора частоты развёртки нужно уже сделать. Наконец, есть разные вспомогательные устройства: потенциометры смещения луча по горизонтали и вертикали; гнезда подачи сигнала прямо на пластины **X** и **Y**, минуя усилители; источник прямоугольного калибрующего сигнала у измерительных осциллографов, и т.д.

### Лекция 9.

Основные темы. Принцип действия электронного осциллографа. Характеристики и подготовка осциллографа к работе. Цифровой осциллограф на базе ПК.

#### Принцип действия электронного осциллографа.

Пусть на пластины **X** подано напряжение, меняющееся по закону, показанному на рис.16а. и называемому пилообразным, причём амплитуда напряжения достаточна для смещения луча до краёв экрана. Тогда луч начинает движение от левого края экрана и с постоянной скоростью (зависящей от промежутка времени  $\Delta t_1$ ) смещается по горизонтали до правого края экрана. Здесь происходит быстрое (почти мгновенное в сравнении с  $\Delta t_1$ ) возвращение луча на левый край экрана, и процесс повторяется. В итоге на экране (рис.16б) луч как бы постоянно движется горизонтально направо с постоянной скоростью. Но из-за инертности глаза и, главное, довольно длительного послесвечения люминофора экрана (это сделано специально) уже при частоте порядка 2 Гц движение луча становится незаметным, и на экране видна просто горизонтальная полоска.

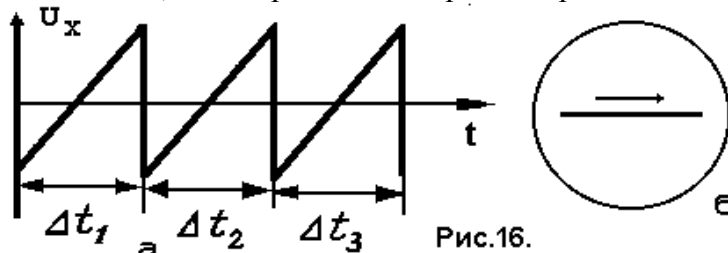


Рис.16.

Пусть теперь только на пластины **Y** подано напряжение, меняющееся, например, по гармоническому закону (рис.17а). Тогда луч начнёт двигаться по вертикали вверх-вниз с переменной скоростью, зависящей от

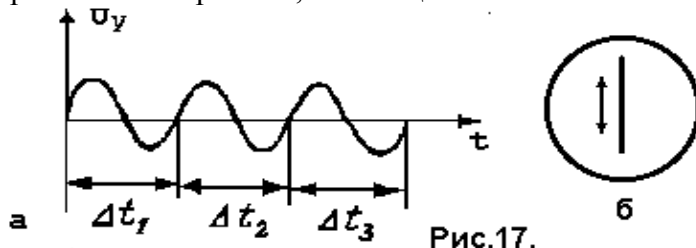


Рис.17.

частоты изменения напряжения. На экране, однако, будет видна, как правило, вертикальная полоска (рис.17б).

Наконец, подадим те же напряжения сразу на обе пары пластин (рис. 18а). Тогда при равенстве периодов (частот) пилообразного и синусоидального напряжений луч, участвуя сразу в двух движениях, нарисует

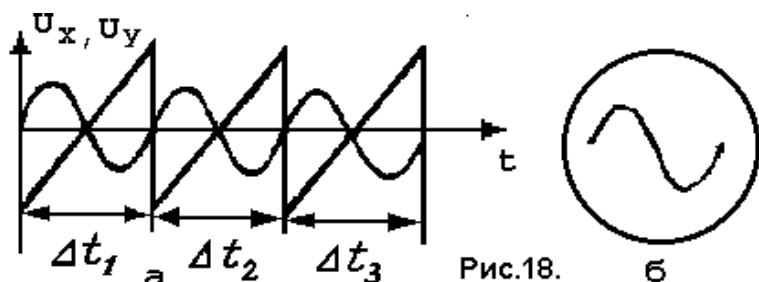


Рис.18.

на экране синусоиду (рис.18б), которая будет периодически изображаться в одном и том же месте экрана. Из-за послесвечения экрана смена изображения незаметна, и мы увидим просто неподвижное изображение синусоиды, размеры которой зависят от амплитуд напряжений  $U_x$  и  $U_y$ . Очевидно, если вместо синусоидального сигнала на пластины  $У$  подавать периодический сигнал любой формы, то при совпадении его периода с периодом пилообразного напряжения на экране увидим неподвижное изображение сигнала, поданного на пластины  $У$ . В этом и состоит принцип работы электронного осциллографа: НА ЭКРАНЕ ВОСПРОИЗВОДИТСЯ ТА ЧАСТЬ ИССЛЕДУЕМОГО СИГНАЛА, КОТОРАЯ ПОПАДАЕТ НА ПЕРИОД СИГНАЛА РАЗВЁРТКИ (так называют здесь пилообразное напряжение).

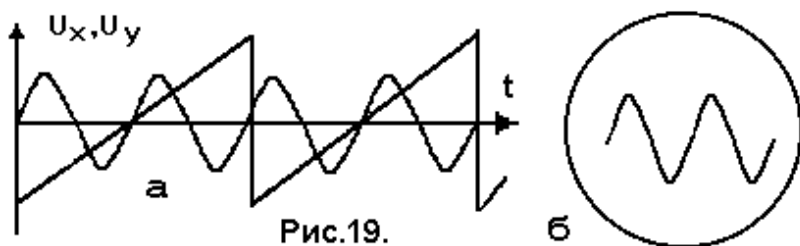


Рис.19.

На практике периоды исследуемого сигнала, поданного на вход  $У$ , и сигнала развёртки обычно не совпадут. Пусть период сигнала развёртки точно вдвое больше (а частота вдвое меньше), чем у исследуемого сигнала. Тогда (рис.19) на экране увидим устойчивое изображение двух периодов исследуемого сигнала; если частота развёртки втрое меньше исследуемого сигнала - три периода, и т.д. Очевидно, что если частота развёртки в целое число раз больше частоты исследуемого сигнала, то на экране увидим части периода (рис.20). Чаще всего отношение частот развёртки и сигнала на пластинах  $У$  не является целым; тогда картина на экране не будет устойчивой, т.к. в разные периоды развёртки изображение сигнала попадает в разные места экрана. Если отношение частот лишь немного отличается от целого числа, неустойчивость невелика (картина плывёт медленно), и сигнал исследовать всё же можно.

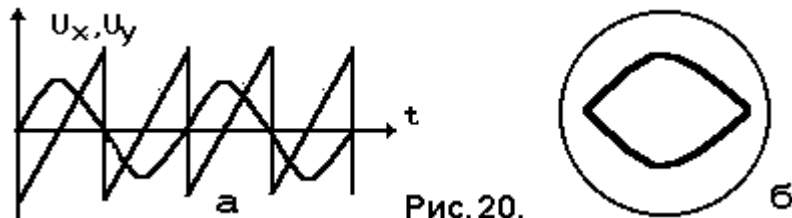


Рис.20.

Следовательно, ЕСЛИ НА ЭКРАНЕ ВИДНО НЕСКОЛЬКО ПЕРИОДОВ ИССЛЕДУЕМОГО СИГНАЛА, ЧАСТОТУ РАЗВЁРТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОДНОГО ПЕРИОДА НУЖНО УВЕЛИЧИВАТЬ; ЕСЛИ ВИДНЫ ЧАСТИ ПЕРИОДА - УМЕНЬШАТЬ. Очень рекомендую самостоятельно попробовать изобразить вид картины на экране при разных отношениях частот развёртки и сигнала – например, 2:3 и 3:2; задолжники по лекциям это сделать будут обязаны.

#### Характеристики и подготовка осциллографа к работе.

Основными характеристиками любого осциллографа являются РАБОЧИЕ ДИАПАЗОНЫ ЧАСТОТ (определяется параметрами генератора развёртки и частотными ха-



рактическими усилителями У и Х) и НАПРЯЖЕНИЙ ИССЛЕДУЕМОГО СИГНАЛА (определяется параметрами делителя напряжения и чувствительностью усилителя У). Осциллограф служит измерительным прибором, поэтому немаловажная его характеристика - точность определения частоты и амплитуды сигнала с помощью шкал частоты развёртки и усиления по У.

Обычно в осциллографах предусмотрена ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ, позволяющая запустить генератор развёртки внешними импульсами определённой амплитуды и полярности в определённые моменты времени (режим ЖДУЩЕЙ РАЗВЁРТКИ); такой режим нужен, например, для синхронизации движения луча по экрану телевизора с движением магнитных головок видеомагнитофонов относительно ленты. В ряде моделей есть несколько лучей; возможность запоминания сигнала (только тогда удаётся исследовать непериодические процессы); возможность подать внешний сигнал на вход Z, т.е. через усилитель на управляющий электрод трубки для изменения яркости изображения (именно модуляция яркости луча видеосигналом используется во всех телевизорах для создания изображения); калибровка частоты развёртки и чувствительности усилителя У с помощью эталонных сигналов (аналог установки нуля омметра), и т.д. и т.п.

Типовым для школ является осциллограф электронный школьный ОЭШ, внешний вид которого показан на рис.21а, а основные органы управления - на рис.21б; в наших лабораториях он также широко используется. На рисунке 1 - делитель напряжения (до 5 и до 250 В); 2 - входные клеммы усилителя У; 3 - выключатель сети (есть индикаторная лампочка); 4 - вход усилителя Х (вторая клемма - "земля" - является общей с усилителем У); 5 и 6 - потенциометры смещения луча по вертикали и горизонтали; 7 и 8 - потенциометры "Яркость" и "Фокус"; 9 - переключатель режима синхронизации на три положения ("Внутр." - подключается блок синхронизации осциллографа, "От сети" - частота развёртки становится равной 50 Гц и позволяет наблюдать сигналы сетевой частоты, "Внешняя" - синхронизация внешним напряжением); 10 - переключатель диапазона частот развёртки (от нуля до 15 кГц, где нуль соответствует отключению развёртки, а цифра - средняя частота данного диапазона); 11 - потенциометр усиления синхронизации; 12 - потенциометр "Частота плавно" для плавного изменения частоты развёртки; 13 и 14 - потенциометры "Усиление У" и "Усиление Х". На задней панели осциллографа имеются также гнезда X и У, позволяющие подать сигнал прямо на пластины X и У, без усиления и ослабления.

Частота развёртки осциллографа ОЭШ меняется от 20 Гц до 18 кГц (т.е. наблюдать можно сигналы до десятков килогерц) при входных напряжениях от сотых долей до 250 В. К сожалению, шкалы потенциометров "Частота плавно" и "Усиление У" не размечены, т.е. измерительным прибором он, строго говоря, не является. В более современных школьных моделях органы управления перенесены на боковую стенку, расширены возможности делителя напряжения, может использоваться трубка с квадратным экраном и т.д., но измерять они также не могут.

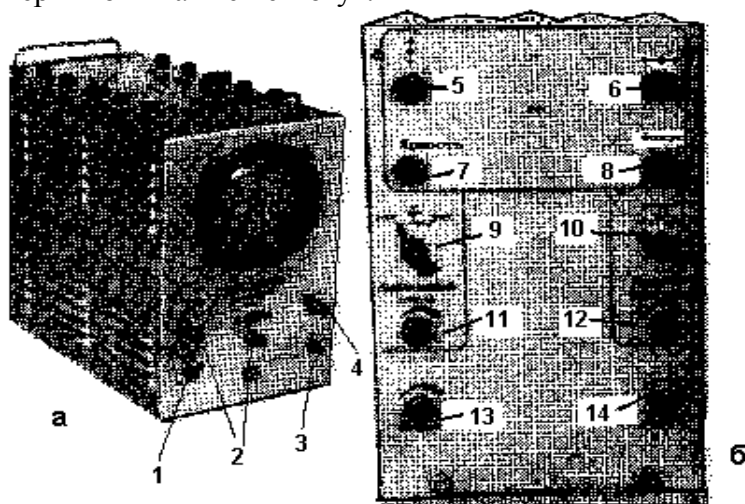


Рис.21.

Подготовка осциллографа к работе необходима, главным образом, чтобы увидеть луч на экране: стандартными ошибками начинающих являются гашение луча ручкой "Яркость" или выведение за пределы экрана, а затем жалобы на неработающий прибор. Перед включением нужно "Яркость" вывести на максимум, а все остальные потенциометры - в среднее положение. После появления луча регулируем его положение, яркость (максимальную оставлять нельзя, т.к. это снизит срок службы трубки!) и фокусировку; положение потенциометров "Усиление У", "Усиление Х" и смещения луча должно быть таким, чтобы изображение не выходило за края экрана. Ручками подбора частоты добиваемся примерной устойчивости изображения (на высоких частотах это - достаточно тонкая операция), а затем в режиме внутренней синхронизации подбираем нужное усиление синхронизации.

### **Цифровой осциллограф на базе ПК.**

Существенным недостатком привычного электронного осциллографа является невозможность наблюдения процессов, не повторяющихся во времени. Действительно, устойчивое изображение исследуемого сигнала на экране осциллографа можно получить лишь при условии, что этот сигнал периодичен, причём период кратен периоду генератора развёртки. Кроме того, простейшие школьные осциллографы вообще не позволяют точно измерить такие важные характеристики сигнала, как его частота и амплитуда; сравнительно малы их чувствительность и частотный диапазон. Снять первые два из этих ограничений позволяет цифровой осциллограф на базе, например, персональной ЭВМ "Ямаха".

Главным блоком осциллографа является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который преобразует внешнее напряжение в цифровой код - последовательность цифр, которые затем вводятся в ЭВМ и обрабатываются по заданной программе. Очевидно, что важнейшими характеристиками АЦП являются его точность, время преобразования (рабочая частота) и чувствительность (или диапазон измеряемых напряжений). Точность определяется числом двоичных разрядов АЦП: если их шесть, то весь диапазон измеряемых напряжений разбивается на  $2^6$  ступени, т.е. на 64 ступеньки, и если наибольшее допустимое для данного АЦП рабочее напряжение равно 6 В, то даже в идеале сигнал меньше 0.1 В (6 В делим на 64 ступеньки) такой АЦП не воспримет. В реальности из-за тепловых шумов неточно оцениваются сигналы, меньшие 3-4 единиц младшего разряда, т.е. в нашем примере погрешность измерения будет порядка 0.3-0.4 В. Для 10-разрядного АЦП число ступенек составит уже  $2^{10}$  ступеньки, т.е. 1024 ступеньки при соответствующем росте точности и чувствительности; правда, и время преобразования при этом пропорционально увеличивается.

Для ПЭВМ "Ямаха" разработано так называемое устройство сопряжения с физическими объектами (УСО), включающее 4 независимых 10-разрядных АЦП с частотой преобразования 33 кГц при диапазоне измеряемых напряжений от -10 до +10 В; их гнезда на верхней панели УСО обозначены как U1, U2, U3 и U4. Кроме АЦП, в устройстве имеются также 2 независимых цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП), назначение которых очевидно из названия: они преобразуют заданный программно цифровой код на выходе ЭВМ в постоянное или переменное напряжение. ЦАП рассчитаны на тот же диапазон выходных напряжений и предельную частоту, что и АЦП; гнезда ЦАП на панели УСО обозначены как V1 и V2. Наконец, на верхней панели находятся гнезда 8 независимых ключей, замыкать и размыкать которые также можно программно; о замыкании каждого ключа сигнализирует контрольная лампочка. Ключи рассчитаны на ток до 0.5 А при напряжении до 220 В, т.е. могут коммутировать мощность до 110 Вт.

УСО подключается к ПЭВМ специальным разъемом, вставляемым в определённом положении в гнездо дисководов "А" на верхней панели ПЭВМ. В разьеме находится постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) со специальной программой на Бейсике (а также на языках Паскаль и Си), позволяющей управлять ключами, запускать тот или иной АЦП, изменять напряжение на выходе ЦАП.

Если в момент подачи исследуемого сигнала включить АЦП и записать выданный им код в память ЭВМ, то в дальнейшем полученную информацию можно многократно извле-

кать из памяти и обрабатывать с помощью обычных операторов Бейсика: вывести на графический экран кривую изменения напряжения со временем, оценить её наибольшее значение и длительность, сравнить с другой кривой, полученной в иной момент времени. Несущественно, будет ли исследуемый сигнал периодичным; важно лишь, чтобы характеристики АЦП были подходящими и имелась соответствующая программа.

Точность и диапазон измеряемых напряжений УСО вполне удовлетворительны - от примерно 0.03 до 10 В при абсолютной погрешности порядка 0.03-0.04 В, а вот скорость отсчёта маловата. Действительно, при исследовании гармонического сигнала частотой 10 кГц на один период синусоиды в идеальном случае - не тратится программное время на каждое включение АЦП - приходится всего 3 отсчёта, что не позволяет восстановить форму сигнала. Если принять число точек отсчета на период сигнала равным хотя бы 20-30, то в рассматриваемом идеальном случае удалось бы наблюдать сигналы частотой не свыше 1-2 кГц. Но для управления АЦП программным путём и занесения цифрового кода в память ЭВМ также требуется время, максимальное для интерпретирующего языка Бейсик. В итоге, когда управление включением АЦП осуществляется операторами Бейсика, реально можно наблюдать сигналы частотой не свыше 15-20 Гц; если для этих целей применяются более быстрые компилирующие языки Паскаль и Си или подпрограмма в машинных кодах, то верхняя рабочая частота нашего цифрового осциллографа повышается до 200-300 Гц, а вот нижней границы нет. Для сравнения напомним, что у осциллографа ОЭШ частота генератора развёртки меняется от 20 Гц до 18 кГц (т.е. наблюдать можно сигналы до десятков килогерц) при диапазоне входных напряжений от сотых долей до 250 В. Видно, что цифровой и электронный осциллографы в учебной лаборатории удачно взаимно дополняют друг друга. Разумеется, существуют гораздо более быстрые и точные АЦП, позволяющие исследовать сигналы частотой в сотни килогерц с ошибкой в несколько микровольт, и соответствующие промышленные универсальные цифровые осциллографы на базе мощных ЭВМ; но в принцип их работы ничего принципиально нового не вносится.

Для использования цифрового осциллографа нужно уметь работать с ПЭВМ "Ямаха" на языке Бейсик, обращаться к внешним запоминающим устройствам (магнитофону или дисководу) и собирать электрические схемы. Напомним, что все внешние по отношению к ЭВМ устройства (дисплей, дисковод, магнитофон, УСО) должны быть включены раньше ЭВМ, а вот отключается она первой. Студенты собирают необходимую электрическую схему, загружают указанную преподавателем или лаборантом программу и в дальнейшем действуют в соответствии с указаниями, содержащимися в описании упражнений или появляющимися на дисплее ПЭВМ при выполнении программы.

**ВНИМАНИЕ!!! Категорически запрещается замыкать на землю гнезда ЦАП, обозначенные V1 и V2! Этот режим короткого замыкания немедленно выведет ЦАП из строя!**

## **11. ОПИСАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **11.1. Указания к выполнению лабораторных работ**

Данный раздел содержит описания лабораторных работ, которые студенты выполняют для знакомства с особенностями физического эксперимента, физическими приборами, методами измерений физических величин и с теорией погрешностей.

Для подготовки к работе в лаборатории достаточно заранее изучить материал лекций и рекомендуемую литературу. При защите лабораторной работы нужно иметь оформленный отчет. Ход и качество отработки экспериментальных умений контролируют лаборант и преподаватель. Усвоение теоретического материала проверяет преподаватель.

**В связи с невозможностью отработки и восстановления пропущенных занятий пропускать лабораторные работы совершенно недопустимо!!! Для того, чтобы считать лабораторную работу полностью выполненной, необходимо:**

- 1) познакомиться с описанием работы и оформить ее по плану, приведенному ниже;
- 2) получить допуск к лабораторной работе (ответить на вопросы преподавателя);
- 3) выполнить практическую часть, произвести необходимые расчеты и построения;
- 4) оформить отчет о проделанной работе в письменном виде;
- 5) защитить работу, т.е. объяснить ход эксперимента, ответить на теоретические вопросы к работе.

**При знакомстве с описанием работы необходимо для самопроверки ответить на следующие вопросы:**

1. какое физическое явление изучается в работе;
2. измерения каких физических величин предстоит произвести;
3. какие измерения являются прямыми, а какие косвенными;
4. какие таблицы необходимо заполнить;
5. графики каких зависимостей необходимо построить;
6. погрешности каких величин необходимо вычислить;
7. что делать категорически воспрещается по правилам техники безопасности.

#### План оформления лабораторных работ

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель работы;
- 3) оборудование, используемое в эксперименте (перечислить);
- 4) краткая теория (основные определения, законы, рабочие формулы);
- 5) ход работы (схема эксперимента (название каждого упражнения должно быть выделено), таблицы измерений, основные расчеты); расчеты погрешностей и графики;
- 6) выводы (анализ погрешностей, графиков, полученных результатов).

Во избежание путаницы при использовании формул для вычисления погрешностей прямых и косвенных измерений, предлагается на черновике оформить таблицу 1.

Таблица 1.

	Измерения	
	прямые	косвенные
Физические величины		
Относительная погрешность		
Абсолютная погрешность		

Отметим некоторые правила построения графиков.

- Разметка осей должна быть равномерной, а единичный отрезок – удобным для выбранного порядка измеренной величины.
- При построении теоретических кривых недопустимо соединять точки ломанными кривыми – необходимо строить наиболее подходящую по теории гладкую зависимость.

- График должен быть подписан, единицы измерения представляемых величин должны быть указаны.
- По оси  $x$  необходимо откладывать изменяемую в эксперименте величину, а по оси  $y$  – величину, которая меняется вследствие изменения первой.
- Не забывайте отображать на графике погрешности измерений.

## 4.2. Элементы теории погрешностей

Ни одна область естественных знаний, в том числе и физика, не обходится без измерений. Измеряя массу тела при помощи весов, длину тела с помощью линейки, интервал времени при помощи секундомера мы проводим сравнение полученных величин с международными эталонами - килограммом, метром и секундой.

Таким образом, процесс измерения фактически сводится к прямому или косвенному сравнению данной физической величины с соответствующим эталоном, причем это сравнение осуществляется посредством измерительных приборов. Реально ни один физический прибор не удастся сделать полностью идентичным эталонному. Ясно, что показания измерительных приборов в большей или меньшей степени отличаются от показаний эталонного прибора. В этом случае говорят, что показания приборов содержат ошибку. Приборная ошибка – это лишь один вид погрешностей измерений.

***Отклонение результатов измерений от истинного значения называют ошибками или погрешностями измерений.***

### Виды ошибок

Ошибки измерений физических величин принято подразделять на *систематические*, *случайные* и *промахи*. При проведении опыта в неизменных условиях систематические ошибки одинаковы. Такие погрешности происходят за счет действия одной и той же причины, которая иногда бывает известна. Например, при обычном взвешивании на тело всегда действует архимедова сила со стороны воздуха, которая обычно очень мала и не учитывается. При многократных измерениях такая погрешность всё время имеет один знак и одну и ту же величину. Если причина известна, то эта погрешность легко поддается учёту и может быть исключена из конечного результата. К сожалению, чаще всего причина неизвестна, и систематическую ошибку можно только учесть.

Наиболее частым видом систематической погрешности является приборная, величина и знак которой заранее неизвестны. Приборная погрешность – это точность, с которой прибор может произвести измерение. Например, с помощью миллиметровой линейки размер предмета можно измерить с погрешностью около 0,5 мм, при помощи микрометра – 10 мкм и т.д. Более точные приборы, как правило, требуют более высокого уровня знаний и навыков при обращении с ними. Если прибор не имеет класса точности, то его погрешность  $\Delta x_{\text{приб}}$  определяется как половина цены деления -  $x_{\text{min}}$ .

$$\Delta x_{\text{приб}} = \frac{x_{\text{min}}}{2} \quad (4.1)$$

Если класс точности прибора известен, то погрешность измеряется по формуле:

$$\Delta x_{\text{приб}} = K \frac{x_{\text{max}}}{100} \quad (4.2)$$

где  $x_{\max}$  – предел измерения прибора.

Случайные ошибки меняются даже в пределах данного опыта и имеют несистематический, вероятностный, статистический характер. Они вызваны большим числом не поддающихся учёту причин.

Промахи же – это чаще всего грубые просмотры экспериментатора: неверно записаны числа, показания сняты с другой шкалы, неправильно включен или расположен прибор и т.п. При вычислении измеряемых величин такие ошибочные данные надо отбрасывать и производить повторные измерения при тех же условиях.

Статистическая (случайная) погрешность вызывается тем, что при повторном измерении какой либо величины достаточно точным прибором редко получаются одинаковые результаты из-за действия случайных факторов. При нескольких измерениях величины  $x$  будет получен набор различных значений  $x_i$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – количество измерений. Самым близким к истине значением измеряемой величины при очень большом числе измерений принимают среднее значение

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.3)$$

На практике трудно сделать достаточно большое количество измерений для максимального приближения к истинному значению измеряемой величины  $x$ . Поэтому обычно определяется статистическая погрешность измерения  $\Delta x_{stat}$ .

$$\Delta x_{stat} = \frac{t(n, \gamma)}{\sqrt{n}} S_n \quad (4.4)$$

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2} \quad (4.4 a)$$

где  $t(n, \gamma)$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от количества измерений  $n$  и требуемой надежности  $\gamma$ ,  $S_n$  – среднеквадратичное отклонение. Смысл статистической погрешности состоит в том, что истинное значение находится в интервале от  $x_{cp} - \Delta x_{stat}$  до  $x_{cp} + \Delta x_{stat}$  с вероятностью  $\gamma$ :

$$x_{cp} - \Delta x_{stat} \leq x_{ист} \leq x_{cp} + \Delta x_{stat}$$

Коэффициент Стьюдента для различных значений уровня надежности и количества измерений определяют из таблицы 2.

Таблица 2

**Значения коэффициента Стьюдента при различных уровнях надежности и количествах измерений**

Число измерений $n$	Надежность $\gamma$			
	50%	90%	95%	99%

2	1	6.31	12.7	63.7
3	0.82	2.92	4.30	9.92
4	0.76	2.35	3.18	5.84
5	0.74	2.13	2.78	4.60
...	...	...	...	...
10	0.70	1.81	2.23	3.17

Так, при уровне надежности  $\gamma = 90\%$  и  $n=4$  получаем  $t(n,\gamma) = 2,35$ .

Суммарная погрешность, определяемая как приборной, так и статистической погрешностью, рассчитывается по формуле

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{стат}}^2 + \Delta x_{\text{приб}}^2} . \quad (4.5)$$

Результат расчета погрешности, как правило, округляют до первой значащей цифры, а среднее значение – до порядка погрешности.

Полученный результат измерений записывается в виде:

$$x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x \quad \text{при надежности } \gamma = 90\%$$

Рассмотренная выше погрешность является абсолютной. Еще одной характеристикой измерений является относительная погрешность, определяемая по формуле

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{ср}}} \cdot 100\% , \quad (4.6)$$

которая показывает, какую долю от среднего значения составляет абсолютная погрешность (в процентах).

Измерения бывают **прямыми** и **косвенными**.

**При прямом измерении** отсчет со шкалы прибора сразу указывает измеряемое значение. Например, вольтметр дает значение измеряемого напряжения, а линейка – значения длины.

**При косвенных измерениях** интересующая нас величина находится при помощи математических операций над непосредственно измеряемыми величинами: измерив какие-то величины, мы находим искомый результат путем вычислений по теоретическим формулам. До сих пор мы говорили о прямых измерениях. Но довольно часто физическую величину нельзя измерить напрямую (например, ускорение, скорость, объем и т.п.). Тогда приходится прибегать к косвенным измерениям.

Пусть известна функциональная зависимость  $f=f(x,y,z)$  величины  $f$ , зависящей от напрямую измеряемых величин  $x, y, z$ : Кроме того, получены в опыте средние значения  $x_{\text{ср}}, y_{\text{ср}}, z_{\text{ср}}$  и найдены погрешности  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  этих величин. Тогда погрешность  $\Delta f$  определяется по формуле

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \Delta z\right)^2} , \quad (4.7)$$

где  $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}$  - частные производные  $f$  по переменным  $x, y, z$ .

Иногда расчёта по формуле (4.7) можно избежать, применяя следующую теорему. Пусть величина  $f$  является алгебраической функцией от величин  $x, y, z$ , то есть при её расчёте используются только арифметические действия и возведение в степень:  $f = (x^\alpha, y^\beta, z^\gamma)$ , где  $\alpha, \beta, \gamma$  - показатели степеней. Тогда относительная погрешность  $\varepsilon_f$  может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon_f = \sqrt{(\alpha\varepsilon_x)^2 + (\beta\varepsilon_y)^2 + (\gamma\varepsilon_z)^2}, \quad (4.8)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  - относительные погрешности величин  $x, y, z$ . После этого абсолютная погрешность может быть рассчитана по формуле

$$\Delta f = \frac{\varepsilon_f \cdot f_{cp}}{100\%}. \quad (4.9)$$



## 11.2. Описания лабораторных работ и дополнительный материал к ним Лабораторная работа № 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМОВ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ И МИКРОМЕТРА.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

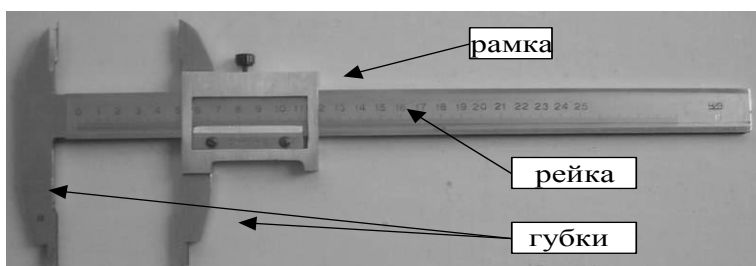
**Цель работы:** Приобретение навыков работы со штангенциркулем и микрометром. Вычисление погрешностей прямых и косвенных измерений.

**Оборудование:** Штангенциркуль, микрометр, цилиндр, шар.

#### Краткая теория

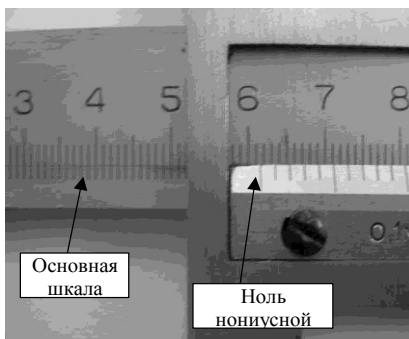
##### Устройство штангенциркуля и правила измерения

Штангенциркуль состоит из подвижной (рамка) и неподвижной (рейка) частей. На рейке нанесена миллиметровая шкала, как на обычной линейке, на рамке – нониусная шкала.



Для определения размера исследуемого тела его нужно зажать между зажимами штангенциркуля.

##### Размер тела определяется по следующим правилам:



1. По числу на основной шкале, напротив которого остановился ноль нониусной шкалы, определяют длину тела в миллиметрах.

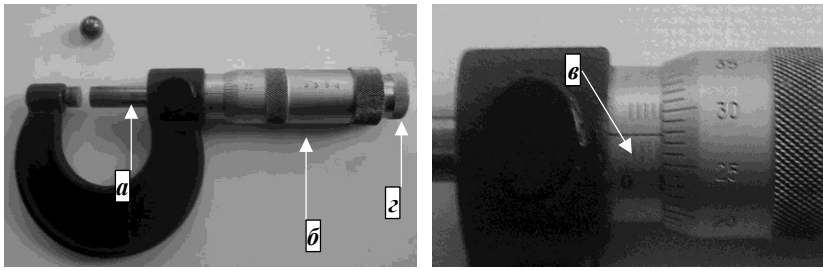
2. Определение остатка в десятичных долях миллиметра производится по числу на нониусной шкале, с которым точно совпало какое-либо деление основной шкалы.

3. Чтобы найти окончательное значение, надо к показанию основной шкалы прибавить показание нониусной

шкалы.

##### Устройство микрометра и правила измерения

Измерение диаметра шара производится микрометром, в котором измеряемый объект зажимается с помощью винта. Ход винта на оборот обычно бывает равен 1 мм или 0,5 мм. На стержне винта *a* укреплен барабан *б* с нанесенной на нем шкалой, имеющей 50 или 25 делений. При зажатом винте ноль барабана должен стоять напротив нуля линейной шкалы *в*, иначе микрометр требует юстировки. Измеряемый предмет помещают между винтом и противоположным ему упором, затем, вращая винт за головку *г*, доводят до соприкосновения с предметом.



По линейной шкале отсчитывают миллиметры, а по шкале барабана – сотые доли миллиметра.

Главным источником ошибок является неравномерность нажатия винта на измеряемый предмет. Момент нажатия фиксируется слабым щелчком. После щелчка головка *z* прокручивается с характерным треском, при этом барабан нельзя закручивать дальше.

**Основные определения, законы, рабочие формулы**

Объем цилиндра находится по формуле:  $V_{ц} = \frac{\pi D^2}{4} H$ , (1.1)

где  $\pi=3,1416$ .

Объем шара находится по формуле:  $V_{ш} = \frac{4}{3} \pi R^3$ . (1.2)

Относительная погрешность определения объема цилиндра согласно формулам (4.6) для определения относительной погрешности высоты и диаметра, и (4.8) имеет следующий вид:  $\varepsilon_V = \sqrt{4\varepsilon_D^2 + \varepsilon_H^2}$ . (1.3)

Аналогично записать, по каким формулам находится: абсолютная погрешность найденного объема цилиндра, относительная и абсолютная погрешности объема шара.

**Ход работы**

*Заранее внимательно изучить материал для дополнительного чтения к лабораторной работе №1.*

**Упражнение 1. Измерение объема цилиндра**

1. Измерьте высоту *H*, и диаметр *D* цилиндра и заполните таблицу, рассчитав средние значения и абсолютную погрешность для высоты  $\Delta H$ , и диаметра -  $\Delta D$  по формуле (4.4).
2. Рассчитайте объем цилиндра по формуле (1.1), результат занесите в таблицу.
3. Определите относительные погрешности измерения высоты  $\varepsilon_H$ , и диаметра  $\varepsilon_D$ . Найдите относительную погрешность объема  $\varepsilon_V$ .

**Таблица 1**

**Результаты измерений параметров цилиндра**

№ пп	H, мм	$\Delta H$ , мм	D, мм	$\Delta D$ , мм	V, мм <sup>3</sup>
1					
2					
3					

4					
5					
6					
7					
Ср. знач.					

4. Рассчитайте абсолютную погрешность объема  $\Delta V$  по формуле (4.9), запишите истинное значение объема в форме:

$$V = V_{cp} \pm \Delta V$$

5. Сделайте и запишите вывод (анализ погрешностей полученных результатов).

**Упражнение 2. Измерение размеров шара и вычисление его объема с помощью микрометра**

1. Измерьте диаметр  $D$  шара и заполните таблицу, рассчитав среднее значение и абсолютную погрешность для диаметра -  $\Delta D$  по формуле (4.4).
2. Рассчитайте объем шара по формуле (1.3), результат занесите в таблицу 2.
3. Определите относительные погрешности измерения диаметра  $\varepsilon_D$ . Найдите относительную погрешность объема  $\varepsilon_V$ .
4. Рассчитайте абсолютную погрешность объема  $\Delta V$  по формуле (4.9), запишите истинное значение объема в форме:

$$V = V_{cp} \pm \Delta V$$

Таблица 2

**Результаты измерений параметров шара**

№ п/п	Измеряемые величины		
	$D_i$ , мм	$D_i - D_{cp}$ , мм	$(D_i - D_{cp})^2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
Сумма			
Среднее			

5. Сделайте и запишите вывод (анализ погрешностей полученных результатов).

**МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1**  
**ИЗУЧЕНИЕ НОНИУСОВ**

**Нониус.** *Нониусом* называется дополнение к обычному масштабу (линейному или круговому), позволяющее повысить точность измерения с данным масштабом в 10—20 раз.

Техника непосредственного измерения длин и углов достигла к настоящему времени большого совершенства. Сконструирован ряд специальных приборов, так называемых *компараторов*, позволяющих измерять длину с точностью до 1 микрона ( $1 \text{ мкм} = 10^{-4} \text{ см}$ ).

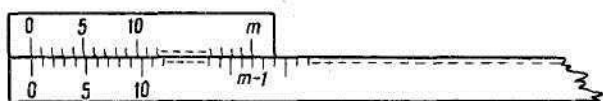


Рис. 1

Большинство из них основано на применении микроскопа и некоторых других оптических приспособлений. Но при этом почти всегда отсчетные приспособления снабжаются нониусами или микрометрами. В ряде случаев требуемая относительная точность измерения длины бывает такова, что можно удовлетвориться абсолютной точностью в сотые или даже в десятые доли миллиметра, а для углов — минутами или долями минут. В этом случае можно для измерения пользоваться обычными масштабными линейками и угломерами, снабженными нониусами. Примерами таких приборов являются штангенциркуль, бус-соль, кипрегель.

*Линейным нониусом* называется маленькая линейка с делениями, которая может скользить вдоль большой линейки также с делениями, называемой *масштабом* (рис. 1).

Деления на нониусе наносятся обычно так, что одно деление нониуса составляет  $\frac{m-1}{m} = 1 - \frac{1}{m}$  делений масштаба, где  $m$  - число делений нониуса. Именно это позволяет,

пользуясь нониусом, производить отсчеты с точностью до  $\frac{1}{m}$  части наименьшего деления

масштаба. Пусть расстояние между соседними штрихами масштаба  $y$ , а между соседними штрихами нониуса  $x$ .

Можно написать, что  $x = y - \frac{y}{m}$ , откуда получаем  $mx = (m - 1)y$ .

Величина 
$$\Delta x = y - x = \frac{y}{m} \quad (1)$$

носит название *точности нониуса*, она определяет максимальную погрешность нониуса. При достаточно мелких делениях масштаба деления нониуса делают более крупными, например  $x_1 = 2y - \frac{y}{m}$ , что дает  $mx_1 = (2m-1)y$ . Точностью нониуса по-прежнему является величина

$$\Delta x_1 = 2y - x_1 = \frac{y}{m}.$$

1. В любом положении нониуса относительно масштаба одно из делений первого совпадает с каким-либо делением второго. Отсчёт по нониусу основан именно на способности глаза фиксировать это совпадение делений нониуса и масштаба.

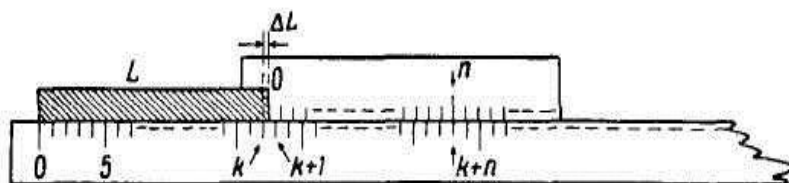


Рис.2

Рассмотрим теперь процесс измерения при помощи линейного нониуса. Пусть  $L$  — измеряемый отрезок (рис. 2). Совместим с его началом нулевое деление основного масштаба. Пусть при этом конец его окажется между  $k$  и  $(k + 1)$ -м делением этого масштаба. Тогда можно написать

$$L = ky + \Delta L,$$

где  $\Delta L$  — неизвестная пока еще доля  $k$ -го деления масштаба.

Приложим теперь к концу отрезка  $L$  наш нониус так, чтобы нуль нониуса совпал с концом этого отрезка. Так как деления нониуса не равны делениям масштаба, то обязательно найдется на нем такое деление  $n$ , которое будет ближе всего подходить к соответствующему  $(k + n)$ -му делению масштаба. Как видно из рис. 2,

$$\Delta L = ny - nx = n(y - x) = n\Delta x,$$

и вся длина будет равна, следовательно,

$$L = ky + n\Delta x$$

или согласно (1)  $L = ky + n \frac{y}{m}$ , что можно сформулировать следующим образом: **длина**

**отрезка, измеряемого при помощи нониуса, равна числу целых делений масштаба плюс точность нониуса, умноженная на номер деления нониуса, совпадающего с некоторым делением масштаба.**

Погрешность, которая может возникнуть при таком методе отсчета, будет обуславливаться неточным совпадением  $n$ -го деления нониуса с  $(k + n)$ -м делением масштаба, и величина ее не будет превышать, очевидно,  $\frac{1}{2}\Delta x$ , ибо при большем несовпадении этих делений,

одно из соседних делений (справа или слева) имело бы несовпадение, меньшее, чем на  $\frac{1}{2}\Delta x$ , и мы произвели бы отсчет по нему. Таким образом, можно сказать, что **погрешность нониуса равна половине его точности.**

**Круговой нониус** представляет собой небольшую дуговую линейку, скользящую вдоль круга (**лимба**), разделенного на градусы или на ещё более мелкие деления (рис. 3). На линейке нанесены деления также в количестве  $m$ , общая длина которых равна  $(m - 1)$  делениям лимба, т. е.  $m\alpha = (m - 1)\beta$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  - выраженные в градусах или минутах цены делений нониуса ( $\alpha$ ) и наименьшего деления лимба ( $\beta$ ).

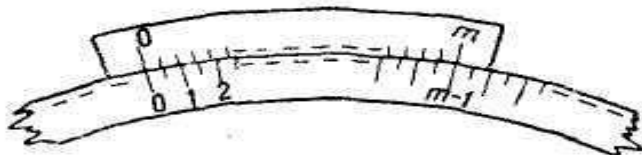


Рис.3

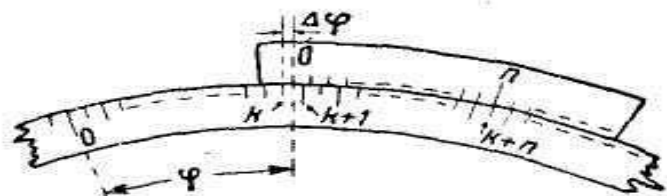


Рис.4

Точность кругового нониуса будет выражаться формулой, совершенно аналогичной формуле (1),  $\Delta\alpha = \frac{\beta}{m}$ . Отсчитываемые от нуля лимба углы (рис. 4) будут вычисляться,

очевидно, по формуле  $\varphi = k\beta + n\Delta\alpha$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ (ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ) ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

**Цель работы:** измерение коэффициента внутреннего трения жидкости.

**Оборудование:** мензурка с маслом, стальные шарики, микрометр, линейка, секундомер.

### Краткая теория и метод исследования

Коэффициент вязкости может быть определен методом шарика, падающего в вязкой среде (метод Стокса). При движении шарика в вязкой среде на тело действует сила внутреннего трения, вычисленная Стоксом.

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v,$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости (динамический; есть ещё и кинематический, который мы не рассматриваем),  $v$  – скорость движения тела.

Зная силу, из этой формулы можно определить коэффициент вязкости. Для нахождения данной силы рассмотрим движение тела (стального шарика) в вязкой жидкости. На шарик, свободно падающий в жидкости, действуют:

1. **Сила тяжести**  $F_T = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 g$ ,

где  $r$  – радиус шарика,  $\rho_2$  – плотность шарика,  $g$  – ускорение свободного падения.

2. **Архимедова сила**  $F = \rho_1 g V = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_1 g$ ,

где  $\rho_1$  – плотность жидкости,  $V$  – объем погруженного в жидкость тела.

3. **Сила сопротивления движению**  $F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v$ .

При движении шарика выберем участок  $S$ , на котором он будет двигаться равномерно. Согласно первому закону Ньютона на этом участке силы, действующие на шарик, уравновешивают друг друга, т.е. их равнодействующая равна нулю.

$$F_T - F_{\text{тр}} - F = 0$$

Подставляя значения сил, получим для **коэффициента вязкости** выражение:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_2 - \rho_1) \frac{gr^2}{v}.$$

**Примечание:** При вычислении среднего значения  $\eta$  рабочую формулу удобно записать

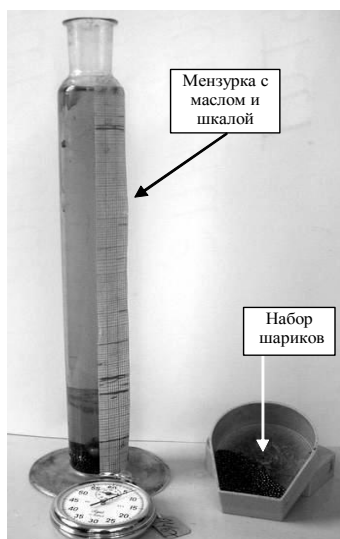
в виде:  $\eta_{\text{ср}} = \frac{Ar_{\text{ср}}^2}{v_{\text{ср}}}$ , где  $A = \frac{2}{9}(\rho_2 - \rho_1)g$ ,

$r_{\text{ср}}$  – средний радиус шарика,  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость равномерного движения шарика.

Итак, средний коэффициент вязкости: 
$$\eta_{\text{ср}} = \frac{2}{9}(\rho_2 - \rho_1) \frac{gr_{\text{ср}}^2}{v_{\text{ср}}}.$$

Плотности: масла  $\rho_1 = 900 \text{ кг/м}^3$ , стального шарика  $\rho_2 = 7800 \text{ кг/м}^3$ .

## Ход работы



1. Измерьте диаметр шарика с помощью микрометра, меняя ориентацию шарика не менее трех раз.
2. Опустите шарик в жидкость как можно ближе к оси цилиндра. Глаз наблюдателя исходно должен находиться на уровне верхней метки.
3. В момент прохождения шариком верхней меткипустите секундомер, а нижней – остановите его. Найдите время  $t$ .
4. Измерьте расстояние между метками и вычислите скорость движения шарика. Занесите её в таблицу.
5. Вычислите значение коэффициента вязкости.
6. Повторите опыт не менее 5-7 раз.
7. Заполните таблицу 1.

8. Вычислите погрешности коэффициента вязкости  $\Delta\eta$  и  $\varepsilon_\eta$ .

Учтите, что *если величина  $f$  является алгебраической функцией от величин  $x, y, z$ :  $f = (x^\alpha, y^\beta, z^\gamma)$ , где  $\alpha, \beta, \gamma$  - показатели степеней, то относительная погрешность  $\varepsilon_f$  может быть рассчитана как:*

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

В нашем случае  $\varepsilon_\eta = \sqrt{(2\varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_S)^2 + (\varepsilon_t)^2}$ ,

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_{cp}}, \quad \varepsilon_S = \frac{\Delta S}{S_{cp}}, \quad \varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t_{cp}},$$

где  $\Delta r$  – половина цены деления микрометра,  $\Delta t$  – секундомера,  $\Delta S$  – половина цены деления линейки.

$$\Delta\eta = \eta_{cp} * \varepsilon_\eta.$$

Истинное значение:  $\eta_{ист} = \eta_{cp} \pm \Delta\eta$  с надежностью  $\gamma$ .

9. По результатам измерений постройте зависимость  $v(r_{cp})$ , чтобы убедиться, что эта зависимость параболическая; затем построить график для  $v(r_{cp}^2)$ .

**Таблица 1**

№ п/п	d (м)	d <sub>cp</sub> (м)	r <sub>cp</sub> (м)	t (с)	S (м)	v (м/с)
1						
2...						
...7						

Ср. зн.	х	х			х	
---------	---	---	--	--	---	--

## 10. Сделайте и запишите вывод.

### МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ

#### К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2а

#### Вязкость.

Течение реальной жидкости по трубе постоянного сечения сопровождается падением статического давления (рис. 1). Это явление объясняется наличием у жидкости **внутреннего трения (вязкости)** и сопровождается переходом части её механической энергии во внутреннюю.

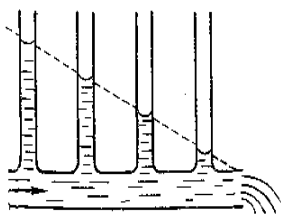


Рис.1

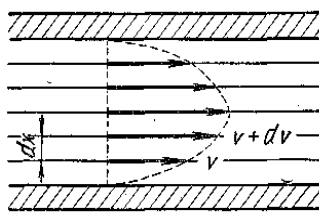


Рис.2

При ламинарном течении жидкости по трубе (рис. 2) скорость слоев непрерывно меняется от максимальной по оси трубы до нуля у стенок.

Любой из слоев тормозит движение соседнего слоя, расположенного ближе к оси трубы, и оказывает ускоряющее действие на слой, расположенный дальше от оси.

Между соприкасающимися слоями жидкости действуют тангенциальные **силы внутреннего трения**. Модуль этих сил зависит от площади  $S$  слоев и градиента скорости  $\frac{dv}{dx}$  (изменения скорости на единицу длины в направлении, перпендикулярном скорости) и определяется формулой Ньютона:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \quad (1)$$

где  $\eta$  — **динамический коэффициент вязкости**, численно равный силе трения, возникающей между параллельно движущимися слоями жидкости единичной площади при единичном градиенте скорости. Единицей коэффициента вязкости является  $1 \text{ кг/с} \cdot \text{м} = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$  (паскаль-секунда).

Коэффициент вязкости различен для разных сред и заметно зависит от температуры. **С ростом температуры вязкость жидкости уменьшается, а вязкость газов увеличивается.** Значения коэффициента вязкости  $\eta$  для некоторых веществ при  $20^\circ \text{C}$  приведены в следующей таблице.

Коэффициент вязкости, Па · с			
Вода	0,001	Глицерин	0,85
Этиловый спирт	0,0012	Воздух	0,000017
Бензол	0,0005		

**Вязкость** некоторых жидкостей (эмульсии, суспензии, растворы полимеров) **зависит** от режима их течения — **давления, градиента скорости**. Это объясняется тем, что структурные элементы жидкости (молекулы, дисперсные частицы) располагаются в потоке по-разному при разных скоростях. Такие жидкости называют **неньютоновскими**.



На тело, движущееся в вязкой среде, действует сила сопротивления. Модуль этой силы зависит от многих факторов, и общей формулы для его вычисления не существует. Для небольших тел сферической формы сила сопротивления при малых скоростях движения определяется **формулой Стокса**:

$$F = 6\pi r\eta v \quad (2)$$

где  $r$  — радиус шарика и  $v$  — скорость его движения. Этот закон используется в лабораторной практике для определения коэффициента вязкости  $\eta$  жидкости.

При движении жидкости по трубе вязкость сказывается на быстроте ее течения. Приведём без вывода формулу Пуазейля, связывающую объем жидкости, ежесекундно протекающей через сечение трубы (расход  $Q$ ), с вязкостью жидкости  $\eta$ , длиной  $l$  трубы и ее радиусом  $r$ :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{p_1 - p_2}{l} \frac{\pi r^4}{8\eta}, \quad (3)$$

где  $p_1 - p_2$  - разность давлений на концах трубы. Формула (3) применима при **ламинарном** течении жидкости, когда вихрей не образуется и слои жидкости не перемешиваются. Ее используют для определения вязкости  $\eta$  жидкостей. Приборы для измерения вязкости называют **вискозиметрами**.

Характер течения вязкой жидкости по трубе радиуса  $r$  определяется безразмерным **числом Рейнольдса**:

$$Re = \frac{\rho v r}{\eta}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $v$  — средняя по сечению скорость ее течения. Течение жидкости становится **турбулентным**, с образованием вихрей и перемешиванием, если  $Re$  превышает некоторое критическое

значение  $Re_{кр}$ . Это может случиться, например, если скорость  $v$  превышает некоторое критическое значение скорости. При  $Re < Re_{кр}$  течение остается ламинарным. Для трубок круглого сечения с гладкими стенками опыт дает приблизительное значение  $Re_{кр} \approx 1000$ .

При турбулентном течении на образование вихрей тратится дополнительная энергия, и проталкивание жидкости по трубе требует больших затрат энергии, чем при ламинарном течении. Введя обозначение

$$R_r = \frac{8l\eta}{\pi r^4},$$

можно формулу Пуазейля записать в следующем виде:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R_r}.$$

Величина  $R_r$  называется **гидравлическим сопротивлением**.

Лабораторная работа № 26

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ (БРОУНОВСКИХ) ЧАСТИЦ МЕТОДОМ НАБЛЮДЕНИЯ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

**Цель работы:** Ознакомиться с принципом действия и приобрести навыки работы с микроскопом при определении объема броуновских частиц.

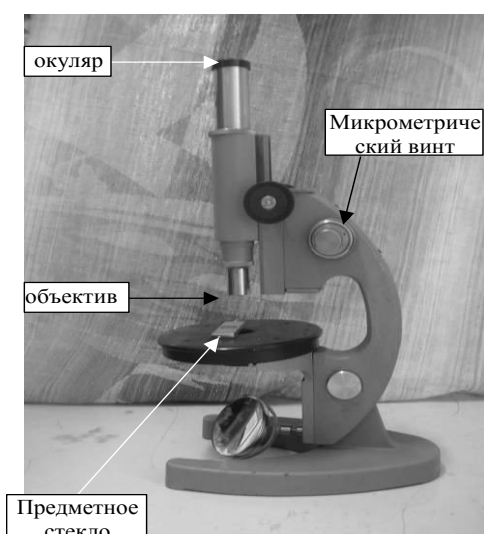
**Оборудование:** предметное стекло с приклеенной к нему ванночкой, эмульсия краски

(акварельной) в воде, секундомер или метроном.

## Описание приборов

Для определения объемов частиц эмульсии краски берут:

1. Микроскоп с микрометрическим винтом, позволяющим наблюдать слои жидкости на различных уровнях.



2. Предметное стекло с углублением, куда наливается эмульсия.

3. Эмульсия из мелко накрошенной акварельной краски и воды.

## Краткая теория

При отсутствии внешнего поля газ (совокупность беспорядочно движущихся молекул) при постоянной температуре равномерно распределяется по всему предоставленному ему объему так, что концентрация молекул одинакова по всему объему во всех частях сосуда.

Но если газ будет находиться во внешнем потенциальном поле, например, в поле силы тяжести, то распределение молекул газа по высоте уже не будет равномерным. Больцман обнаружил, что если в том месте, где потенциальная энергия частицы равна  $U_1$ , концентрация частиц ( в частности, молекул газа) равна  $n_1$ , то в том месте, где потенциальная энергия будет равна  $U_2$ , концентрация будет другой, равной

$$n_2 = n_1 e^{-(U_2 - U_1)/RT} \quad (1)$$

Эта формула описывает так называемое распределение Больцмана. Оно справедливо не только для молекул газа, но и для любых частиц, совершающих беспорядочное (броуновское) движение, как в данной работе.

Для частиц, совершающих броуновское движение, и для молекул газа или жидкости средние кинетические энергии равны друг другу, а разность потенциальных энергий частицы на двух уровнях равна работе  $A_{12}$  силы тяжести по перемещению этой частицы с одного уровня на другой:  $U_1 - U_2 = A_{12}$ .

С учётом сил тяжести  $P = mg$  и силы Архимеда  $F_A = m_{ж}g$ , которые нужно выразить через объём  $V$  частиц и плотности жидкости  $\rho_0$  и краски  $\rho$ , имеем  $A_{12} = Fh$ ;

$$F = P - F_A \Rightarrow A_{12} = (P - F_A)h; A_{12} = (mg - m_{ж}g)h$$

или  $A_{12} = (\rho V g - \rho_0 V g) h$ ; окончательно

$$U_1 - U_2 = A_{12} = (\rho - \rho_0) g h V \quad (2)$$

где  $h$  – расстояние между уровнями  $h_1$  и  $h_2$ ,  $g$  – ускорение свободного падения. Плотность частиц краски равна  $1,06 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , плотность жидкости (воды) –  $10^3 \text{ кг/м}^3$

Отсюда на основании (1), (2) имеем:

$$V = kT \frac{\ln \frac{n_2}{n_1}}{g(\rho - \rho_0)h}, \quad (3)$$

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

Соотношение (3) даёт возможность определить объём частиц краски в воде. В настоящей работе отношение концентрации частиц на разных высотах можно принять равным отношению средних чисел частиц в поле зрения, заключающихся в данном слое.

$$V = kT \frac{\ln \frac{N_{cp1}}{N_{cp2}}}{g(\rho - \rho_0)h}; \quad (4)$$

Для большей точности измерения производят 10 отсчётов частиц, одновременно видимых в поле зрения через равные промежутки времени (время отсчитывают секундомером или метрономом). За концентрацию принимают число частиц в данном слое.

### Ход работы

1. Приготовить эмульсию и влить ее в ванночку на столике микроскопа.
2. С помощью винта грубой настройки установить тубус микроскопа так, чтобы отчетливо были видны частицы краски на самом нижнем из возможных уровней эмульсии.
3. Отсчитать число частиц  $N$ , одновременно появляющихся в поле зрения микроскопа в течение каждых 10 секунд, записать данные в таблицу. Произвести 10 таких подсчетов, вычисляя число частиц  $N$ .
4. Пользуясь микроскопическим винтом, поднять тубус на 200 микрон и произвести снова 10 таких же отсчетов. Определить среднее значение для  $N$ . Расчеты повторить 3 раза и занести в таблицу, добавив столбцы для  $N_{3i}$  измерений.

№	$N_{1i}$	$N_i - N_{cp}$	$(N_i - N_{cp})^2$	$N_{2i}$	$N_i - N_{cp}$	$(N_i - N_{cp})^2$
1						
2						
3						
...						
10						
$\Sigma$						

5. Рассчитываем среднее значение и стандартное отклонение числа наблюдаемых частиц по формулам (5) и (6).

$$N_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (5)$$

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N_{cp})^2}. \quad (6)$$

Зададим надежность  $\gamma = 0,95$  и по таблице определим коэффициент Стьюдента  $t_{\gamma,n}$  (где  $k = n-1$  – число степеней свободы).

Рассчитаем предельную доверительную погрешность по формуле:

$$\Delta N = t_{\gamma,k} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

тогда истинное значение запишем в виде:

$$N_{ист} = N_{cp} \pm \Delta N. \quad (8)$$

Строим графическую зависимость  $N_{ист}$  от  $h$  (высоты уровня, которую высчитываем по показаниям микрометрического винта).

Найти расстояние между слоями, в которых производились наблюдения. При этом необходимо учесть, что перемещение  $h'$  дает так называемое оптическое расстояние между уровнями. Оно связано с реальным расстоянием  $h$  соотношением  $h = nh'$ , где  $n = 1,33$  – показатель преломления воды.

6. Определить объём частиц краски по формуле (4). Температура жидкости принимается равной комнатной.  
7. Заполнить таблицу:

№ п/п	$N_{cp}$ , шт.	$H$ , м	$t$ , °C	$T$ , К	$V$ , м <sup>3</sup>
1			22°C		x
2		$50 \cdot 10^{-6}$			
3		$100 \cdot 10^{-6}$			
4		$150 \cdot 10^{-6}$			
5		$200 \cdot 10^{-6}$			

**9. Записать выводы к упражнениям и графикам.**

**МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ**

**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 26.**

### **Опытное обоснование молекулярно-кинетической теории**

Рассмотрим некоторые явления, экспериментально подтверждающие основные положения и выводы молекулярно-кинетической теории

**1. Броуновское движение.** Шотландский ботаник Р. Броун (1773 — 1858), наблюдая под микроскопом взвесь цветочной пыльцы в воде, обнаружил, что частицы пыльцы оживленно и беспорядочно двигались, то вращаясь, то перемещаясь с места на место, по-

добно пылинкам в солнечном луче. Впоследствии оказалось, что подобное сложное зигзагообразное движение характерно для любых частиц малых размеров ( $\approx 10^{-6}$  м), взвешенных в газе или жидкости. Интенсивность этого движения, называемого **броуновским**, повышается с ростом температуры среды, с уменьшением вязкости и размеров частиц (независимо от их химической природы). Причина броуновского движения долго оставалась неясной. Лишь через 80 лет после обнаружения этого эффекта ему было дано объяснение: **броуновское движение взвешенных частиц вызывается ударами молекул среды, в которой частицы взвешены**. Так как молекулы движутся хаотически, то броуновские частицы получают толчки с разных сторон, поэтому и совершают движение столь причудливой формы. Таким образом, **броуновское движение является подтверждением выводов молекулярно-кинетической теории о хаотическом тепловом движении атомов и молекул**.

### Лабораторная работа № 3

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом действия электроизмерительных приборов, научиться производить электрические измерения.

**Оборудование:** источники питания РНШ, В-24, ВС-4-12, ВУП-2, ГЗШ, авометры АВО-5 и АВО-63, школьный демонстрационный гальванометр, малый мост Витстона ММВ, реостат.

*Перед занятием внимательно изучить материалы для дополнительного чтения к лабораторной работе № 3 и лекции.*

### Краткая теория

Характеристики электроизмерительных приборов определяются по следующим пунктам:

1. название прибора;
2. рабочее положение;
3. род тока;
4. система;
5. предел измерения;
6. цена деления;
7. класс точности;
8. погрешность прибора;
9. измеряемая величина.

На шкале или в паспорте электроизмерительных приборов обычно задан *класс точности* прибора  $k$ , т.е. **ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ В ПРОЦЕНТАХ ОТ ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ  $Z_{\text{пред}}$** . Тогда абсолютную погрешность измеренной величины легко найти по формуле

$$\Delta Z = \frac{Z_{\text{пред}} \cdot k}{100\%} \quad (1)$$

Существуют приборы семи стандартных классов: 0.1, 0.2, 0.5 (прецизионные или особо точные), 1.0, 1.5; 2.5 и 4.0; если класс не указан, то ошибка превышает 4,5% и прибор класса точности не имеет. Есть и более точные приборы. **НЕЛЬЗЯ ПУТАТЬ КЛАСС ТОЧНОСТИ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ ОПЫТА**: измеряемая величина  $Z$  обычно меньше предела измерения, поэтому систематическая относительная погрешность

$\delta Z = \frac{\Delta Z}{Z} \cdot 100\%$  обычно больше класса точности, причем тем больше, чем меньше вели-

чина  $Z$  в сравнении с пределом измерения  $Z_{\text{пред}}$ . Действительно, абсолютная погрешность  $\Delta Z$  определяется пределом измерения и постоянна. Следовательно, для снижения относительной систематической погрешности нужно стремиться к показаниям прибора, близким к пределу измерения.

*Для приборов без класса точности абсолютная погрешность принимается равной половине цены деления шкалы.*

### **Ход работы**

#### **Часть 1. Подготовка к измерениям.**

1. Найти на столах элемент электрической цепи по его условному обозначению на схеме и объяснить назначение; для предложенного элемента нарисовать обозначения на схемах и объяснить назначение.
2. По обозначениям на шкале электроизмерительного прибора определить все его характеристики; рассчитать приборную погрешность.
1. Описать порядок измерений с помощью школьного демонстрационного гальванометра; определить все его характеристики.
2. Описать порядок измерений с помощью авометра АВО–5.
3. Описать порядок измерений с помощью авометра АВО–63.
4. Описать порядок измерений малым мостом Витстона ММВ.
5. Объяснить назначение всех органов управления источников питания РНШ, В-24, ВС-4-12, ВУП-2, ГЗШ.
6. Для предложенного преподавателем случая вычислить максимальную погрешность измерения электрической величины.
7. Для предложенного реостата определить допустимое напряжение при разных положениях ползунка.

#### **Часть 2. Электрические измерения.**

1. С помощью авометра определить напряжение на клеммах источника питания; найти сопротивление своего тела, взяв проводники авометра руками. Выполнить взаимопроверку с соседней бригадой.
2. С помощью школьного демонстрационного гальванометра измерить напряжение источника питания; измерить ток через реостат, подключенный к этому источнику. Выполнить взаимопроверку с соседней бригадой.
3. В собранной электрической цепи объяснить назначение всех элементов, начертить схему этой цепи и добиться горения лампочки (в том числе найдя с помощью омметра место обрыва).
4. Через реостат подключить к источнику питания катушку с неизвестным сопротивлением и с помощью закона Ома рассчитать это сопротивление. Определить максимальную погрешность измерения. Результат проверить прибором ММВ.

**Записать выводы к проделанной работе.**

## **МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ**

### **К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 3**

#### **Электроизмерительные приборы**

Существует значительное число приборов для измерения электрических характеристик – силы тока (амперметры), напряжения (вольтметры), сопротивления (омметры), мощности (ваттметры) и т.д. К основному названию всех приборов при изменении их чувстви-

тельности добавляются названия десятичных приставок: Мега  $10^6$ , кило  $10^3$ , милли  $10^{-3}$ , микро  $10^{-6}$ , нано  $10^{-9}$  и пико  $10^{-12}$  - например микроамперметр или мегаомметр.

Приборы с высокой чувствительностью (предел измерения несколько микроампер) называют *гальванометрами*. Обычно они отличаются и точностью. Гальванометры особой конструкции, отклонение стрелки которых пропорционально прошедшему заряду, называют баллистическими гальванометрами.

Сильные токи можно измерить с помощью гальванометра, если параллельно ему подключить высокоточный резистор (стандартные резисторы имеют относительную погрешность 5%) с малым сопротивлением – ШУНТ.

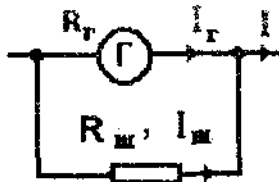


Рис.1

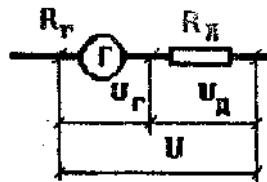


Рис.2

Тогда по законам параллельного соединения резисторов основной ток  $I_{ш}$  пойдет по шунту (рис.1), причем общий ток  $I=I_{Г}+I_{ш}$  и отношение токов гальванометра и шунта обратно их сопротивлениям

$$\frac{I_{Г}}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_{Г}}.$$

Пусть ток  $I$ , который нужно измерить данным гальванометром, в  $n$  раз больше его предельного тока  $I_{Г}$ , т. е.  $n = \frac{I}{I_{Г}}$ .

Тогда 
$$R_{ш} = R_{Г} \frac{I_{Г}}{I_{ш}} = \frac{R_{Г}}{(n-1)}.$$

Это и есть **формула шунта**

$$R_{ш} = \frac{R_{Г}}{(n-1)}. \quad (1)$$

Заметим, что амперметр, включаемый всегда в разрыв цепи, вносит своим присутствием изменение тока тем более сильное, чем выше его сопротивление, поэтому сопротивление амперметров стремятся сделать как можно меньшим. Шунт позволяет удовлетворить и это требование.

Аналогично при необходимости измерения больших напряжений **последовательно с гальванометром** включают **добавочное сопротивление**. Пусть сопротивление гальванометра  $R_{Г}$  (рис. 2) и предельное напряжение  $U_{Г}$ . А измерить нужно большее напряжение  $U$ , причем  $n = \frac{U}{U_{Г}}$ . Тогда включение добавочного сопротивления  $R_{д}$  приведет к перераспределению напряжений: по законам последовательного соединения резисторов

$U=U_{Г}+U_{д}$ ; большее напряжение падает на большем сопротивлении, т.е.  $\frac{U_{д}}{U_{Г}} = \frac{R_{д}}{R_{Г}}$ . Отсюда

$$R_{д} = R_{Г} \frac{U_{д}}{U_{Г}} = R_{Г}(n-1).$$

Это и есть формула **добавочного сопротивления**

$$R_{д} = R_{Г}(n-1). \quad (2)$$

Вольтметр, включаемый параллельно какому-то участку цепи, за счёт ответвляющегося в него измерительного тока искажает исходное напряжение тем сильнее, чем меньше сопротивление прибора. Поэтому стремятся сопротивление вольтметров сде-

лать как можно больше; добавочные сопротивления способствуют выполнению данного условия. Заметим, что формула (2) годится при расчёте любого добавочного сопротивления, когда нужно погасить часть избыточного напряжения.

Из чувствительного гальванометра легко сделать прибор для измерения больших токов или напряжений (и малых сопротивлений), а вот обратное вообще невозможно. Поэтому на практике используют **многопредельные приборы** - гальванометры с целым набором шунтов и добавочных сопротивлений, подключаемых по очереди и позволяющих изменять предел измерения; шкал может быть несколько, но обычно используется одна. Если в приборе есть ещё и внутренняя батарейка, он способен измерить сопротивление. Такой универсальный прибор для измерения токов, напряжений и сопротивлений называют АмперВольтОмметром или **авометром** (в ряде моделей можно измерять также ёмкости конденсаторов).

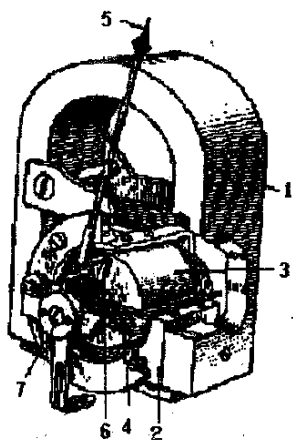


Рис.3

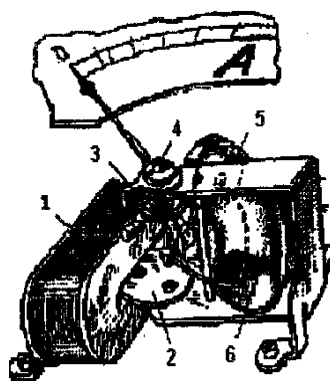


Рис.4

Очевидно, что здесь приходится использовать несколько переключателей и шкал.

Необходимость нескольких шкал часто бывает связана с ещё одной причиной: большинство точных гальванометров имеют **магнитоэлектрическую систему**, способную измерять лишь постоянные токи. Действительно, прибор такой системы (рис.3) использует свойство рамки с током (4) поворачиваться под действием сил Ампера в магнитном поле сильного постоянного магнита 1 до тех пор, пока плоскость рамки не станет перпендикулярной полю. В приборе повороту рамки препятствуют две высокоточные спиральные пружинки (6), по которым подводится ток, поэтому отклонение стрелки (5), закрепленной на одной оси (7) с рамкой, будет пропорциональным току в ней; без пружин измерение невозможно. В итоге шкала прибора линейна (цена деления одинакова в любом месте шкалы), что удобно для измерений, достаточно высока чувствительность и точность при не слишком сложной конструкции. В частности, железные полюсные наконечники (2) и цилиндр (3), на котором находится рамка, не только концентрируют и резко усиливают поля магнита и рамки, увеличивая их взаимодействие, но и экранируют от внешних магнитных полей; корректор позволяет поворотом одной из пружин установить стрелку на шкале; алюминиевый каркас рамки за счёт возникающих в нём токов Фуко служит успокоителем (демпфером) колебаний, и стрелка быстро устанавливается в рабочее положение. Вместе с тем, рамка боится сильных токов; кроме того, при смене направления тока изменяется и направление поворота стрелки, т.е. для измерения переменных токов прибор не пригоден. Поэтому в универсальных приборах с гальванометрами магнитоэлектрической системы приходится сначала переменный ток выпрямлять с помощью, например, полупроводникового диода. Но он как вносит собственное сопротивление, так и является нелинейным устройством (да ещё с ограниченным рабочим интервалом частот), поэтому отдельную шкалу для тока использовать приходится обязательно. Иногда для напряжений также имеется отдельная шкала, так что в ампервольтметре делают по 2 шкалы для переменных и постоянных величин. В авометре, следовательно, шкал в таком случае будет



уже 5. Но даже если для токов и напряжений использовать одну и ту же шкалу, в авометре должно быть как минимум 3 шкалы - переменных величин, постоянных величин и сопротивления.

Приборы **электромагнитной системы** (рис. 4) состоят из многовитковой катушки (1) с прорезью, куда при пропускании тока втягивается железный сердечник (2), эксцентрично закрепленный на одной оси (4) со стрелкой. Высокоточная спиральная пружина (3) создаёт противодействующий момент, пропорциональный углу поворота. Слабые токи прибор чувствует плохо и шкала неравномерная. Демпфирующий поршень (5), также соединённый со стрелкой, при движении внутри цилиндра (6) испытывает сопротивление воздуха и быстро успокаивает колебания стрелки. Существенным преимуществом прибора является его работоспособность, как на постоянном, так и на переменном токе: при смене направления тока в катушке в сердечнике направление намагниченности также меняется, и направление втягивающего момента сохраняется. Не боится он и перегрузок по току, прочен, прост в устройстве. Вместе с тем, меньшая точность, чем в магнитоэлектрической системе, нелинейность шкалы и чувствительность ко внешним магнитным полям являются недостатками прибора, не позволяющими использовать его в качестве гальванометра. **Обычно приборы такой системы служат для измерения только переменных токов и напряжений сравнительно больших величин.**

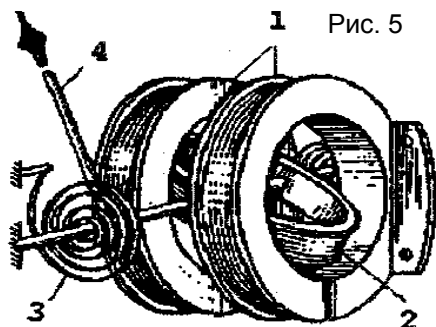
Приборы **электродинамической системы** (рис.5) состоят из двухсекционной неподвижной катушки (1), внутри которой может поворачиваться подвижная катушка (2), закрепленная на одной оси со стрелкой (3) и демпфером (не показан). Спиральная пружина (4) создаёт противодействующий момент. При пропускании тока через катушки их магнитные поля взаимодействуют. Катушки можно соединить параллельно (амперметр), последовательно (вольтметр) и не соединять вообще, а подключить одну (с малым числом витков из толстого провода) в разрыв цепи, вторую же (с большим числом витков тонкого провода) - параллельно.

Тогда вращающий момент оказывается пропорциональным мощности, и прибор можно применять как ваттметр с равномерной шкалой; при измерении напряжений и токов шкала неравномерная.

Существенное достоинство прибора - его работоспособность на переменном и постоянном токах. Точность достаточно высока. Вместе с тем, конструкция сравнительно сложна и не выдерживает механических или электрических перегрузок; шкала амперметров и вольтметров этой системы, напомним, неравномерна.

Широко применяются в лаборатории два прибора магнитоэлектрической системы - **демонстрационные амперметр и вольтметр** (рис. 6); они могут использоваться и как гальванометры. Каждый прибор имеет по три вставляемых сверху сменных шкалы (гальванометра "Г" с нулем посередине и делениями 5-0-5, переменной "~" и постоянной "-" величин; последние две шкалы двухсторонние), 5 клемм (две красные для гальванометра с плюсом справа, три клеммы для переменной и постоянной величин с общей клеммой посередине).

На задней поверхности находятся корректор нуля и ящичек с добавочными сопротивлениями для вольтметра и шунтами для амперметра.



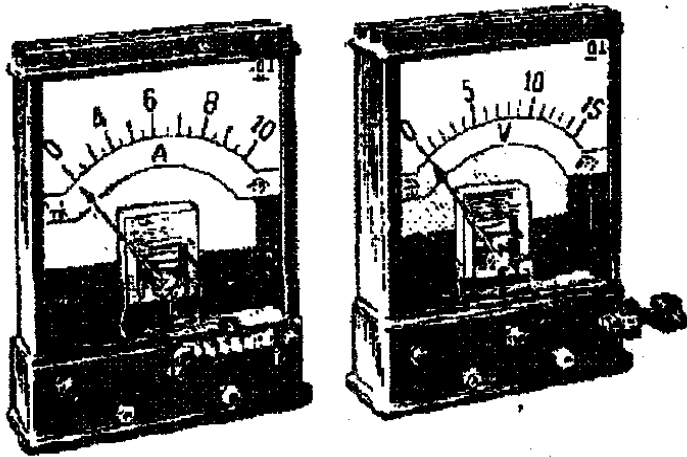




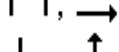





Рис. 6

Гальванометр амперметра имеет собственное сопротивление порядка 385 Ом, и при токе 0,25 мА стрелка отклоняется на все 5 делений, т.е. чувствительность составляет около 50 мкА/дел (точные данные конкретного прибора указаны на шкале гальванометра). С шунтами (используются одни и те же) можно измерять переменный и постоянный токи до 3 А и до 10 А. Гальванометр вольтметра имеет собственное сопротивление порядка 2,3 Ом, и при напряжении 10 мВ от среднего положения стрелка отклоняется до конца шкалы, т.е. чувствительность составляет 2 мВ/дел. С добавочными сопротивлениями можно измерить *постоянные* напряжения до 5 или 15 В и переменные - до 15 или 250 В; имеются 4 разных добавочных сопротивлений.

#### Некоторые обозначения на шкалах приборов

-  - прибор магнитоэлектрической системы;
-  - прибор электромагнитной системы;
-  - прибор электродинамической системы;
-  - рабочее положение прибора горизонтально ;
-  - рабочее положение прибора вертикально ;
-  - прибор переменного тока ;
-  - прибор постоянного тока ;
-  - прибор измеряет и переменный, и постоянный токи .

#### Авометры АВО-63 и АВО-5

В лаборатории используются два типа авометров: АВО-5 (рис.7) и АВО-63 (рис.8). В обоих измерителем служит прибор магнитоэлектрической системы; оба содержат по три основных шкалы (в АВО-5 есть ещё шкала децибел, которая нами не используется); оба авометра имеют переключатель вида работ (1) и потенциометр установки нуля омметра (2). Из рисунков видно, что в остальном конструкция и возможности авометров существенно разные.

В частности, АВО-5 имеет значительно более широкий диапазон измеряемых величин: в крышке прибора поставляются специальные высоковольтные наконечники, позволяющие измерять напряжение до 6000 В. Предусмотрена возможность установки как одной плоской батарейки на 4,5 В, так и ещё трёх таких батареек. Пределы измерения постоянного тока - от 60 мкА до 12 А. Выбор измеряемой величины и предела измерений осуществляется в три этапа:

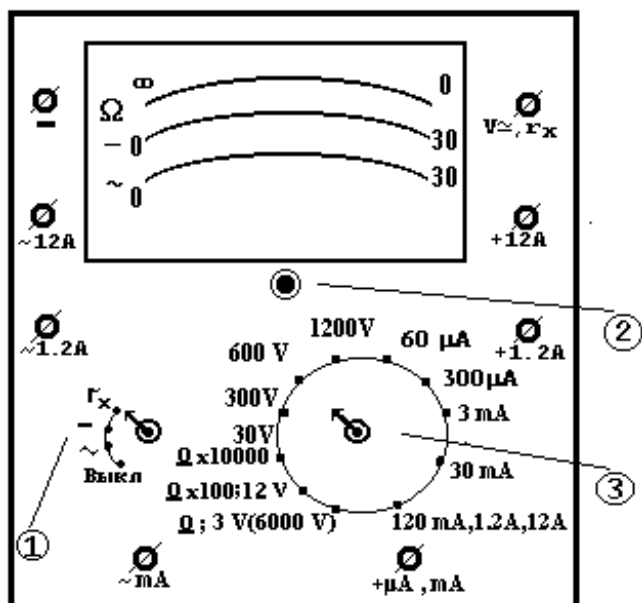


Рис. 7

I. Сначала переключателем (1) (на четыре положения, из которых рабочих три - омметра "Ω", постоянных величин "-" и переменных "~" величин) выбираем вид работ.

II. Затем **переключателем предела измерений** (3) выбираем нужный диапазон;

III. Наконец, выбираем нужные клеммы. Единственной универсальной является клемма "-" в левом верхнем углу (её называют "общий минус"): один проводник всегда подключается сюда. При измерении напряжений и сопротивлений второй проводник подключаем к правой верхней клемме; все остальные клеммы предназначены для измерения токов (постоянных - с правой стороны, и переменных - с левой). Наименьший предел измерения для переменного тока 3 мА; пределы 300 и 60 мкА - только для постоянного тока. В некоторых моделях прибора в ручке потенциометра (2) имеется кнопка, нажатие которой замыкает клеммы омметра и позволяет быстро установить его в нулевое положение перед измерением сопротивления.

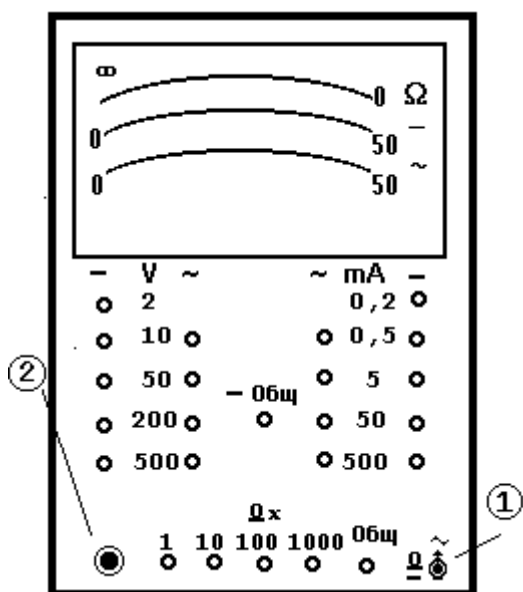


Рис.8.

В приборе АВО-63 есть лишь переключатель вида работ (1) на два положения - одно для постоянных величин и омметра, другое - для переменных величин. Предел измерения можно изменить путём выбора гнезд, причём общих гнезд два - одно для омметра, другое

для измерения токов и напряжений ("общий минус"). На шкалах переменных и постоянных величин по 50 делений; для удобства измерений нанесено, однако, три ряда цифр.

## Лабораторная работа № 4

### ИСТОЧНИКИ ТОКА

**Цель работы:** Познакомиться с назначением и принципом действия источников тока.

**Оборудование:** источники тока В-24, ВС-4-12, РНШ, ВУП, ГЗШ, аккумулятор, реостаты, соединительные провода.

#### Краткая теория

В учебных лабораториях физики используются всего два вида источников питания: химические (аккумуляторы и гальванические элементы); сеть переменного тока частотой 50 Гц с действующим напряжением 220 В.

**Об устройстве и принципе действия используемых источников питания прочитать лекции и материалы для дополнительного чтения к работе № 4, а затем оформить краткую теорию.**

#### Ход работы

##### Часть 1. Подготовка к измерениям.

1. Найти на столах источник тока по его условному обозначению на схеме и объяснить назначение; для предложенного преподавателем источника тока нарисовать обозначение в схемах и объяснить назначение.
2. Для схемы делителя напряжения взяты два резистора – на 50 и 100 Ом – мощностью 10 Вт каждый. Какое предельное входное напряжение можно подать на делитель? Какие напряжения можно получить на выходе? Будет ли влиять сопротивление нагрузки на эти значения? Занести в тетрадь все данные.
3. Используя предложенный преподавателем реостат на 3 клеммы в качестве потенциометра, теоретически определить и занести в тетрадь:
  - наибольшее (предельно допустимое) входное напряжение;
  - положения ползунка в соответствии с правилами техники безопасности;
  - выходное напряжение при заданных преподавателем входном напряжении и двух разных положениях ползунка;
  - наименьшее допустимое сопротивление нагрузки при входном напряжении потенциометра в половину найденного выше предельно допустимого и положении ползунка по середине обмотки;
  - потребляемый при этом нагрузкой ток в сравнении с предельным током обмотки реостата.
4. Схематично зарисовав в тетрадь вид передних панелей источников тока В-24, ВС-4-12, ВУП и ГЗШ, указать на рисунках назначение всех клемм, переключателей, ручек управления и т.д.
5. К источнику тока с неизвестными ЭДС и внутренним сопротивлением подключили сначала нагрузку сопротивлением 10 Ом, а затем 16 Ом. В первом случае потребляемый ток составил 3 А, а во втором – 2 А. Определить и занести в тетрадь ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

##### Часть 2. Измерения.

1. С помощью авометров определить наибольшее напряжение на всех клеммах источников тока В-24, ВС-4-12, РНШ, ВУП, ГЗШ. Определить максимальную погрешность измерения. Выполнить взаимопроверку с соседней бригадой.
2. Правильно выбирая пределы измерений и частоту развертки, с помощью осциллографа ОЭШ получить и зарисовать в тетрадь устойчивое изображение сигналов на всех выходах следующих источников тока: В-24 и аккумуляторной батареи; ВС 4-12 и РНШ; ВУП, ГЗШ. Указать, какие из выходов постоянного напряжения выпрямителей являются одно- или двухполупериодными; какие дают фильтрованное напряжение.
3. Подключив к источнику постоянного тока реостат с известным сопротивлением, по двум измерениям тока нагрузки рассчитать ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока. Взять следующие источники: ВС 4-12 (допустимый ток – до 2А); В-24 (допустимый ток – до 10 А); ВУП на выходе  $0 \pm 100$  В (допустимый ток – до 10 мА); щелочная аккумуляторная батарея (допустимый ток – не свыше 2-3 А). Оценить максимальную погрешность измерения.

**К каждому упражнению запишите ВЫВОД.**

## **МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ**

### **К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 4**

1. Гальванический элемент служит только источником постоянного тока с ограниченными ЭДС (порядка 1,5 – 2 В на элемент, поэтому для роста общей ЭДС их часто соединяют последовательно в батарее) и мощностью определяемой внутренним соединением. Все так называемые сухие элементы (их представители известны в быту, как круглые и плоские батарейки для фонариков и бытовых приборов, хотя батареей является лишь плоская, составленная из трех круглых элементов) – это современные аналогии элементов Даниеля и Лекланше, имеющие довольно большое внутреннее сопротивление – до единиц Ом. Следовательно, полезная их мощность составляет лишь единицы Ватт на элемент. Ограничен и срок службы из-за саморазряда. Вместе с тем, в измерительных целях, где не требуются большие токи и напряжения, данные элементы очень удобны, именно они обеспечивают работу омметра в авометрах. В ряде лабораторных работ применяется как эталон для сравнения нормальный элемент Вестона, который обладает очень стабильной ЭДС, порядка 1 В, известной с высокой точностью. Ток его, однако, не должен превышать единиц микроампер (например, сопротивление нагрузки не должно быть меньше сотен кОм). Поэтому основное применение он находит в приборах, измеряющих ЭДС компенсационным методом.

Главное отличие аккумуляторов от гальванических элементов – возможность перезарядки. Издавна существует два основных вида аккумуляторов – щелочные и кислотные (сейчас появились и другие типы). При близких ЭДС (около 2 В) они отличаются внутренним сопротивлением, которое у используемых в учебных лабораториях физики щелочных сравнительно велико (единицы Ом), а у кислотных может быть сделано очень малым (миллиОмы). В итоге вторые обеспечивают очень большие токи (сотни Ампер) и применяются, например, в качестве стартерных источников автомобилей. В учебных лабораториях (особенно в школе) используются только указанные щелочные аккумуляторы, которые не боятся коротких замыканий. Кислотные аккумуляторы в такой ситуации могут просто взорваться и облить окружающих едким содержимым.

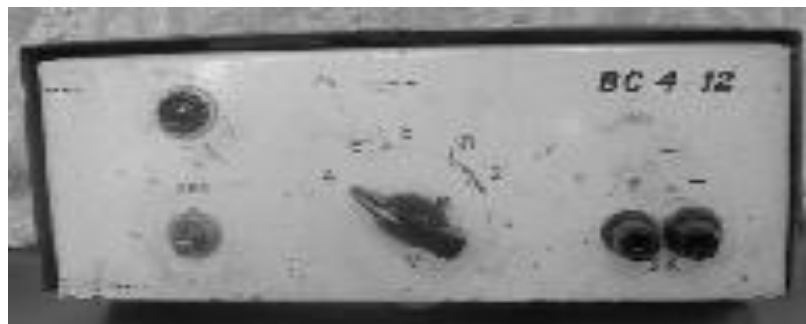
Заметим, что запас энергии химических источников тока принято называть ёмкостью. Она измеряется несистемными единицами – Ампер-часами (А-час). Ёмкость зависит от сопротивления нагрузки  $R$  и показывает, какой заряд можно пропустить по цепи с помо-

щью данного источника при определенном стандартном R. Очевидно, 1 А-час=3600 Кл. Следовательно, батарейка для карманного фонарика ёмкостью 0,5 А-часа, как бы «содержит» гигантский заряд 1700 Кл.

2. Сеть переменного тока обеспечивает питание только переменным током с фиксированными частотой 50 Гц и напряжением 220 В при большой мощности (стандартные плавкие предохранители рассчитаны на ток до 10 А, т.е. на мощность до 2,2 кВт). Для многих лабораторных работ, однако нужны источники с другими характеристиками – высоковольтные постоянного тока, постоянного тока большой мощности, переменного тока с другими частотой и напряжением и т.д. Поэтому в лаборатории широко используются выпрямители, регуляторы напряжения, звуковые генераторы и другие устройства, позволяющие изменить вид тока, его частоту и величину напряжения.

Заметим, что все учебные приборы с металлическими корпусами обязательно имеют ручки для переноски и органы управления, выполненные из диэлектрика и предохраняющие от поражения электрическим током при попадании напряжения на корпус (например из-за перетиранья сетевых проводов). Только изолированных частей и можно касаться, когда прибор находится под напряжением.

3. Выпрямители простейшей конструкции преобразуют с помощью вентильных устройств (полупроводниковых диодов, селеновых столбиков и т.п.) переменное напряжение сети в одно- или двухполупериодное пульсирующее. В более сложных устройствах предусмотрена плавная или ступенчатая регулировка выходного напряжения, а в самых качественных – еще преобразование пульсирующего напряжения в постоянное с помощью индуктивно-конденсаторного или конденсаторного фильтра. Заметим, что селеновые выпрямители менее чувствительны к перегрузкам, чем полупроводниковые: если после пробоя столбика (слышен громкий щелчок и ощущается характерный запах селена) быстро снизить нагрузку, то выпрямитель сохранит работоспособность. Для полупроводникового выпрямителя никаких признаков перегрузки нет, он просто перестает работать.



Однополупериодный выпрямитель селеновый типа BC-4-12 позволяет получить регулируемое ступеньками по 2 В пульсирующее выходное напряжение в диапазоне 4-12 В при токе до 1,5 А.

Простейший двухполупериодный выпрямитель селеновый школьный ВСШ-6 дает нерегулируемое выходное напряжение 6 В при токе до 2 А. Фильтра в нем нет, т.е. выходное напряжение пульсирующее.

Двухполупериодный выпрямитель селеновый BC-24 (есть и полупроводниковый вариант В-24) позволяет получить плавно регулируемые пульсирующее (в диапазоне 0-24 В) и переменное (0-30 В) напряжения. Выпрямитель на лицевой панели содержит ручку регулятора напряжения 1 (цена деления шкалы – примерно 5 В), вольтметр и амперметр (только постоянного тока), выходные клеммы переменного «~» и постоянного («-» и «+») напряжений, индикаторную лампочку и выключатель питания. Предельный ток – 10 А.



Двухполупериодный выпрямитель универсальный полупроводниковый ВУП-2 имеет два выхода с регулируемым напряжением и три – с нерегулируемым. Регулируемый выход постоянного напряжения 0-250 В имеет индуктивно-конденсаторный фильтр и обеспечивает ток до 50мА; регулируемый выход постоянного биполярного напряжения  $0\pm 100$  В имеет конденсаторный фильтр и обеспечивает ток до 10 мА. Нерегулируемые выходы имеют такие характеристики: +250 – те же, что у регулируемого 0-250 В; +350 – не отфильтрованное пульсирующее напряжение при токе до 220 мА; выход  $\sim 6,3$  В с током до 3 А предназначен специально для питания нитей накала электронных ламп. Наконец, на передней панели имеется разъем специальной формы для питания счетчика ионизирующих частиц.



Отметим два обстоятельства: во-первых, выходы +350 В и  $0\pm 100$  В можно соединять последовательно, позволяя регулировать напряжение от 250 до 450 В; во-вторых, регулятор напряжения биполярного выхода  $0\pm 100$  В имеет нулевое положение в среднем положении, а не в положении поворота против часовой стрелки до отказа, стандартном для всех регуляторов.

Заметим, что существует как более старая модель этого выпрямителя под названием ВУП-1 (с теми же характеристиками, но корпусом другой формы), так и более современная ВУП-2М, не позволяющая получить, например, регулируемое выпрямленное напряжение до 250 В.



Регуляторы напряжения – *устройства, позволяющие изменить только величину напряжения. Широко используется лабораторный автотрансформатор ЛАТР и регулятор напряжения школьный РНШ – тот же ЛАТР, но в металлическом корпусе и с вольтметром. С их помощью можно изменять напряжения переменного тока в диапазоне*

от 0 до 250 В при максимальном токе до 4,5 А. **Внимание! Через каждые 45 минут работы нужно отключать прибор для охлаждения на 15 минут.**

Заметим, что простейшими регуляторами напряжения служат рассмотренные на лекциях резисторный делитель напряжения и потенциометр.

Звуковой генератор – устройство, позволяющее получить переменное синусоидальное



напряжение регулируемой частоты и амплитуды. Генератор звуковой школьный ГЗШ преобразует напряжение сети в напряжение другой частоты и амплитуды. Рабочий диапазон частот – от 20 Гц до 20 кГц – разбит на три диапазона (переключатель-множитель с указаниями «x1», «x10» и «x100»), в пределах каждого из которых возможна плавная регулировка частоты по круговой шкале. Предусмотрены три значения выходного сопротивления: «5

Ом», «600 Ом» и «5000 Ом», позволяющие повысить полезную мощность генератора в случае разной нагрузки. Напомним, что полезная мощность максимальна, если внутреннее сопротивление источника питания и сопротивление нагрузки совпадают. Величину выходного напряжения позволяет плавно регулировать ручка «Усиление». Генератор рассчитан на мощность до 5 Вт. **Внимание!** На выходе «5000 Ом» наибольшее напряжение может достигать 250 В.

В новых моделях ГЗШ есть и встроенный усилитель низкой частоты.

## Лабораторная работа № 5

### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

**Цель:** изучение принципа действия и возможностей электронного осциллографа.

**Оборудование:** Электронный осциллограф, выпрямитель ВУП–2, ВС-24 М, звуковой генератор, провода соединительные.

#### Краткая теория

**Осциллограф в основном применяется для следующих целей:**

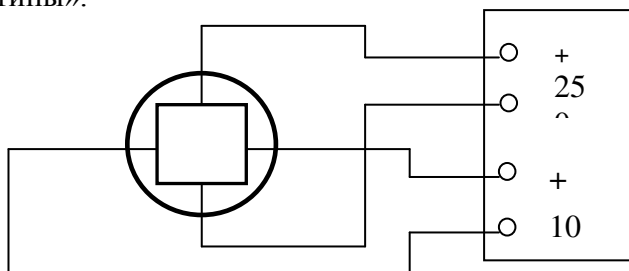
1. Для исследования быстрых периодических процессов – любых, которые удастся преобразовать в зависимость напряжения или тока от времени. Обычно изучается форма кривой или зависимость от другого процесса.
2. Для сравнения амплитуд двух напряжений или двух токов.
3. Для сравнения фаз двух токов, двух напряжений или тока и напряжения.
4. Для определения частот колебаний, измерения малых промежутков времени.

**Изучить устройство и принцип действия в лекциях и материале для дополнительного чтения к лабораторной работе № 5.**

#### Ход работы



Зарисовать в тетрадь рис. 1 и разобраться в выводе формулы (8) из дополнительных материалов; записать его в тетрадь. Ознакомиться с описанием электронного осциллографа, включая раздел: «Непосредственная подача исследуемого напряжения на отклоняющие пластины».



Изучить расположение ручек управления и их назначение.

### Упражнение 1. Подача постоянного напряжения на пластины.

Включить осциллограф и приготовить его к работе. Собрать схему, показанную на рисунке.

Подать непосредственно на пластины «X» напряжение с клемм  $\pm 100$  В выпрямителя ВУП, изменяя его потенциометром. Объяснить наблюдающееся явление. То же проделать для пластин «Y», подключая их к клеммам 250 В. Что произойдет, если подать постоянное напряжение сразу на обе пластины «X» и «Y»? Прodelать опыт и записать выводы.

### Упражнение 2. Подача переменного напряжения на пластины.

Подать переменное напряжение частотой 50 Гц с клемм прибора В-24 на пластины «X», а затем на пластины «Y». Объяснить наблюдающиеся явления. Что произойдет, если уменьшать частоту подаваемого напряжения? Записать выводы.

### Упражнение 3. Измерение чувствительности трубки осциллографа.

Подадим с выпрямителя ВС-24 М переменное напряжение на пластины «X». Используя вольтметр для определения величины подаваемого напряжения  $U$ , а сетку на экране осциллографа для определения длины сигнала  $L$ , определим чувствительность трубки  $\gamma$  по формуле:

$$\gamma = \frac{L}{2\sqrt{2} \cdot U}$$

Определить погрешность вычисления чувствительности. Как с помощью осциллографа определить величину неизвестного напряжения?

### Упражнение 4. Получение фигур Лиссажу.

Подать на пластины «Х» переменное напряжение частотой 50 Гц с выпрямителя ВС-24 М, а на пластины «У» напряжение с выхода «600 Ом» звукового генератора. Зарисовать устойчивые фигуры Лиссажу для соотношения частот 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5. Как можно использовать фигуры Лиссажу для определения частоты сигнала? Выключив генератор развертки, получить те же фигуры Лиссажу, подавая напряжение с ВС-24 М и звукового генератора на входы «Х» и «У», а не на пластины.

Исследовать влияние усилителей на размер изображения.

### Упражнение 5. Наблюдение синусоидального напряжения.

Не отключая ВС-24, включить генератор развертки. Подавая на выход «У» напряжение частотой 50, 500 и 5000 Гц со звукового генератора, каждый раз изменением частоты развертки и усиления синхронизации добиться устойчивого изображения периода синусоиды. Как с помощью генератора развертки определить частоту сигнала? Почему при включенном генераторе развертки не получается фигура Лиссажу? Записать выводы.

### Упражнение 6. Наблюдение сигнала генератора развертки.

Установить еще один осциллограф и подать на вход «У» одного осциллографа напряжение с пластин «Х» другого. При этом частоты развертки обоих осциллографов должны совпадать. На экране будет наблюдаться пилообразный сигнал.

## МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ

### К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 5

**Устройство и работа электронного осциллографа.** Обычно электронный осциллограф представляет собой прибор, состоящий из электронно-лучевой трубки, усилителей исследуемого сигнала, генератора развертки и выпрямителя.

Простейший электронный осциллограф отличается от остальных осциллографов отсутствием в схеме предварительного усиления исследуемого сигнала. Тогда он позволяет регистрировать только переменные процессы, мгновенное значение напряжения которых составляет несколько десятков вольт.

Электронно-лучевая трубка позволяет получить узкий сфокусированный пучок электронов, который практически является безынерционным. По принципу фокусировки и отклонения электронного луча трубки бывают двух типов: электростатические и магнитные. В трубках первого типа для фокусировки и отклонения луча используется электрическое поле, в трубках второго типа — магнитное поле. Остановимся более подробно на устройстве вакуумной электростатической электронно-лучевой трубки, в которой фокусировка луча осуществляется при помощи двух электронных линз.

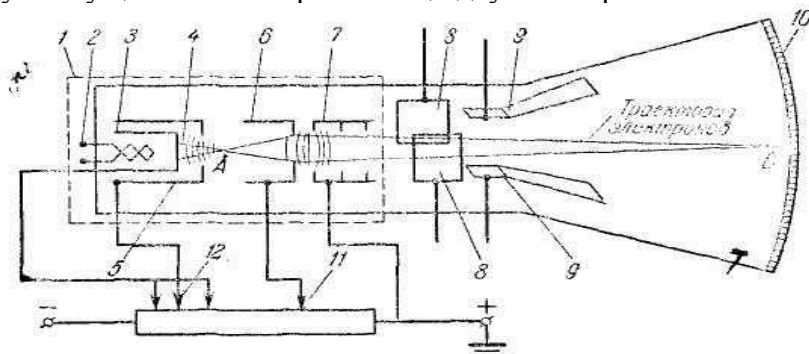


Рис. 1

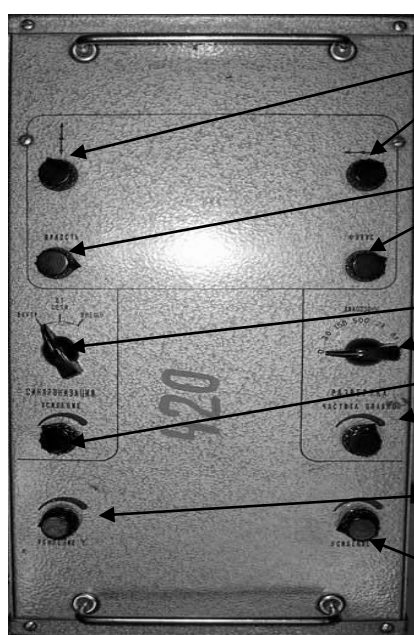
На рис. 1 показано схематическое устройство электронно-лучевой трубки. Она состоит из электронной пушки 1 (выделена пунктиром на рисунке), отклоняющих пластин 8 и 9, рас-

положенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и флуоресцирующего экрана 10. Управление фокусировкой и яркостью электронного луча в трубке осуществляется напряжением, подаваемым с движков 11 и 12 потенциометра. Электронной пушкой называется часть трубки, дающая пучок электронов. В эту часть трубки вмонтированы: подогревный катод 3, являющийся источником электронов; фокусирующий цилиндр 5, регулирующий количество электронов, движущихся к экрану: первый (фокусирующий) анод 6 и второй (ускоряющий) анод 7. Напряжение, приложенное к первому и второму анодам, ускоряет электроны и концентрирует их в узкий пучок. Поле между катодом, фокусирующим цилиндром и первым анодом образует объективную электронную линзу, окулярная электронная линза образуется полем первого и второго анодов.

Плоская торцовая поверхность катода 4 покрывается пленкой оксидированного специального металла, например бария, и подогревается нитрируемыми с вольфрамом и фотонами, полупроводниками, движущимися фокусирующей электрической сеткой и точкой А вблизи электронов пока к нулю. В анодах поле электронов, при прохождении после анодами - бо-



**Экран**  
**Вход X**  
**Вход Y**  
**Делитель Y до 5В, до 220В**  
**индикатор**  
**Вкл.**  
 Большинство электронов направляется трубки электрическим полем между фокусирующим цилиндром. Электрические правильно направленные, проходят через отверстие цилиндра и под действием электрического поля, которое благодаря напряжениям, приложенным к катоду управляющему первому аноду, сходятся в фокус А за ним. После точки А электроны расходятся, так как напряжение внутри первого анода близка к нулю. В области между первым и вторым анодами поле снова искривляет траектории электронов, приближая их к оси трубки. Траектории электронов после анодов более пологие (вследствие большей скорости электронов) и в точке В фокусируются. Если эта точка находится на поверхности экрана, то пучок называется сфокусированным.



**Ручки регулировки по осям координат**  
**Управление фокусировкой и яркостью**  
**Синхронизация; внутренняя от сети, внешняя.**  
**Диапазон частот**  
**Синхронизация усиление.**  
**Развертка частота плавно.**  
**Усиление Y**  
**Усиление X**

Аноды, являющиеся частью системы электронных линз, имеют форму цилиндров или дисков с отверстиями в центре или представляют собой комбинацию дисков и цилиндров. Перегородки внутри первого и второго анодов служат для улавливания электронов, не удовлетворя-

ющих условиям фокусировки.

Экран трубки представляет собой слой флуоресцирующего вещества, нанесенного на внутренней стороне трубки. В качестве флуоресцирующих составов используются вилле-

мит, вольфрамово-кислый кальций, фосфористый сульфид цинка. Точка экрана, на которую попадают электроны, светится, и мы видим место попадания электронов. В зависимости от состава экрана пятно может быть белого, зеленого или синего цвета. Испускание света после удара электрона обычно длится в течение долей секунды. Для увеличения времени послесвечения существуют специальные экраны.

Цифрами 8 и 9 на рис. 1 отмечены вмонтированные в трубку горизонтально и вертикально отклоняющие пластины. Если к пластинам какой-либо пары приложено напряжение, то электронный луч отклоняется. Величина этого отклонения пропорциональна напряжению между пластинами. На вертикально расположенные пластины 8 подается обычно напряжение от генератора развертки, которое заставляет пятно двигаться на экране в горизонтальной плоскости. Если на пару горизонтально расположенных пластин 9 подать исследуемое периодически меняющееся напряжение, то пятно будет перемещаться по экрану в вертикальной плоскости. Таким образом, одновременное действие обеих пар пластин на электронный луч позволяет наблюдать на экране изменение исследуемого напряжения во времени.

Если период напряжения развертки равен или кратен периоду исследуемого напряжения, картина за период развертки будет повторяться, и мы увидим на экране неподвижную (застывшую) кривую.

Чувствительностью трубки к напряжению называют отклонение пятна на экране (в миллиметрах), вызванное напряжением 1 В на отклоняющих пластинах. Будем считать эти пластины (взяты вертикально отклоняющие) параллельными, а электростатическое поле однородным и перпендикулярным плоскости пластин. Пусть  $L$  - длина пластин,  $d$  - расстояние между ними,  $S$  - расстояние от конца пластин до экрана,  $V$  - потенциал второго анода относительно катода,  $U_d$  - напряжение между пластинами. Тогда в области между пластинами электрон по вертикали, вдоль оси  $Y$ , движется под действием поля равноускоренно, и его смещение по оси  $Y$  при выходе из области между пластинами будет

$$y_1 = at_1^2/2, \quad (1)$$

где  $a$  - ускорение под действием поля,  $t_1$  - время пролёта пластин. Но

$$a = eE/m = e U_d / (md), \quad (2)$$

где  $E$  - напряжённость поля пластин,  $e$  и  $m$  - заряд и масса электрона. Очевидно, что время пролёта  $t_1$  определится длиной  $L$  пластин и горизонтальной составляющей скорости  $v_x$  электронов

$$t_1 = L / v_x. \quad (3)$$

Эта составляющая определится из условия  $mv_x^2/2 = eV$ , откуда

$$v_x^2 = 2eV/m. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим для смещения внутри пластин

$$y_1 = eU_d L^2 / (2dmv_x^2)$$

Смещение  $y_2$  электронов в области вне пластин можно найти как

$$y_2 = v_y t_2, \quad (5)$$

где  $v_y$  - вертикальная скорость электронов на вылете из пластин, а  $t_2$  - время пролёта расстояния  $S$  от конца пластин до экрана. Очевидно, что

$v_y = at_1$ , а время  $t_2 = S/v_x$ . Подставляя эти значения в (5), получим

$$y_2 = eU_d L S / (dmv_x^2), \quad (6)$$

откуда полное отклонение  $y = y_1 + y_2$  запишется как

$y = eU_d L (0,5L + S) / (dmv_x^2) \approx eU_d L S / (dmv_x^2)$ . Поскольку на практике действительно  $S \gg 0,5L$ , формула верна с высокой точностью.

Подставляя  $v_x$  из (4), получим окончательно

$$y = U_d LS / (2Vd). \quad (7)$$

Важность этой формулы в том, что она доказывает: боковое смещение луча по экрану пропорционально напряжению  $U_d$  между пластинами. Аналогичная формула получится и для смещения луча по горизонтали.

Для чувствительности  $j$  получим

$$j = y / U_d = LS / (2Vd). \quad (8)$$

Итак, для повышения чувствительности нужно увеличивать потенциал 2-го анода и отодвигать его от пластин; раздвигать пластины не стоит, т.к. это нарушит однородность поля между ними и все наши расчёты.

### Сложение гармонических колебаний

Одна и та же материальная точка может участвовать одновременно в двух или более колебаниях. Нахождение закона результирующего колебательного движения называется *сложением колебаний*. Рассмотрим несколько простых случаев сложения гармонических колебаний.

#### а) Сложение колебаний одного направления

1. При сложении двух гармонических колебаний одного направления

$$x_1 = A \cos \omega t \quad \text{и} \quad x_2 = A \cos(\omega t + \Delta\varphi)$$

с **равными частотами**  $\omega$ , одинаковыми амплитудами  $A$  и разностью фаз  $\Delta\varphi$  результирующее колебание

$$x = x_1 + x_2 = 2A \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \cos \left( \omega t + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) = A_p \cos \left( \omega t + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \quad (9)$$

является также гармоническим и имеет частоту  $\omega$ .

Его амплитуда

$$A_p = 2A \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (10)$$

зависит от разности фаз  $\Delta\varphi$  слагаемых колебаний. При  $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$  амплитуда максимальна ( $A_p = 2A$ ) - складывающиеся колебания взаимно друг друга усиливают. При  $\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi$  колебания складываются «в противофазе» и взаимно друг друга гасят ( $A_p = 0$ ). В случае когда амплитуды  $A_1$  и  $A_2$  слагаемых колебаний неодинаковы,  $A_p = A_1 + A_2$  при  $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$  и  $A_p = A_1 - A_2$  при  $\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi$ .

2. При сложении колебаний с разными частотами результирующий процесс получится **периодическим, если эти частоты относятся как целые числа**. На рисунке 3 показан результат сложения двух колебаний с частотами  $\omega$  и  $2\omega$ .

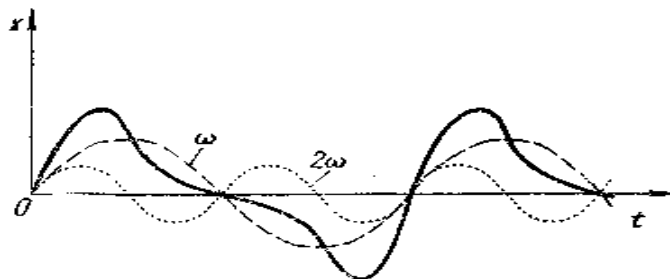


Рис. 3

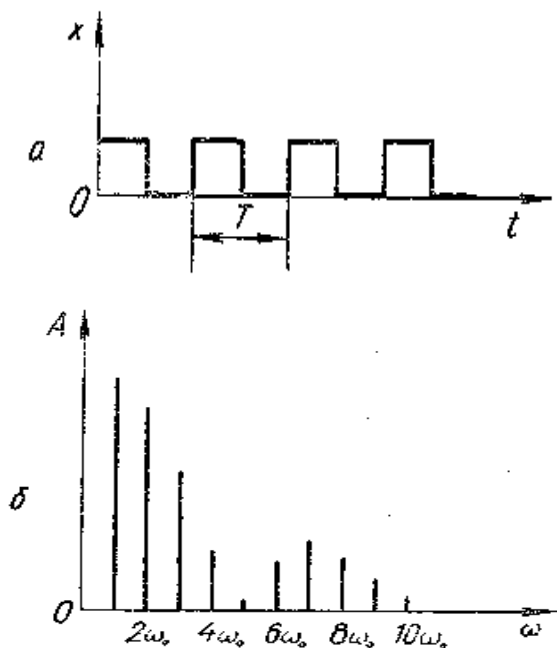


Рис.4

Возможна и обратная задача: представить негармоническое колебание как результат сложения некоторого числа гармонических колебаний (*гармонический анализ*).

Практически можно передать особенности любого сложного колебательного процесса, подобрав сумму конечного числа гармоник, т. е. разложив колебание в спектр. Спектр колебания содержит данные о частоте и амплитуде гармоник, составляющих сложное колебание. На рисунке 4, б дан спектр колебания прямоугольной формы (рис. 4, а). Гармонический анализ применяют для исследования сложных колебаний (электрических, звуковых и др.). С этой целью используют специальные приборы — *гармонические анализаторы*.

**б) Сложение взаимно перпендикулярных колебаний**

1. Если частоты слагаемых колебаний относятся как целые числа, то точка описывает сложные замкнутые кривые - *фигуры Лиссажу*, форма которых зависит от соотношения частот и разности фаз исходных

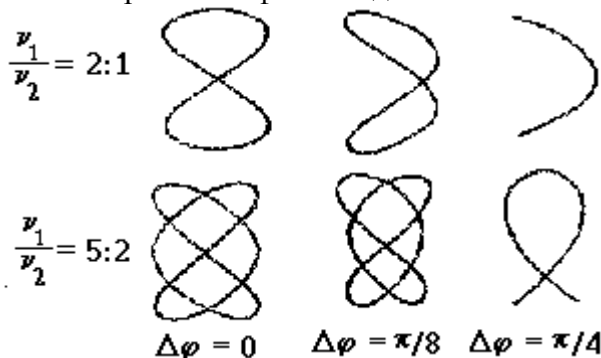


Рис 5.

колебаний. Некоторые из них показаны на рисунке 5. Фигуры Лиссажу можно наблюдать на экране осциллографа, заставив электронный луч колебаться во взаимно перпендикулярных направлениях.

2. Если частоты колебаний одинаковы, а их фазы отличаются на  $\frac{\pi}{2}$ :

$$x = A_1 \cos \omega t \quad \text{и} \quad y = A_2 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = A_2 \sin \omega t \quad (11)$$

то результирующее движение точки происходит по плоской траектории, уравнение которой можно получить, исключив время из уравнений (3).

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1$$

Эта траектория - эллипс, оси которого совпадают с осями  $x$  и  $y$  (рис. 6).

Форма и расположение эллипса могут меняться с изменением разности фаз исходных колебаний (рис. 7). Он, в частности, может вырождаться в прямую.

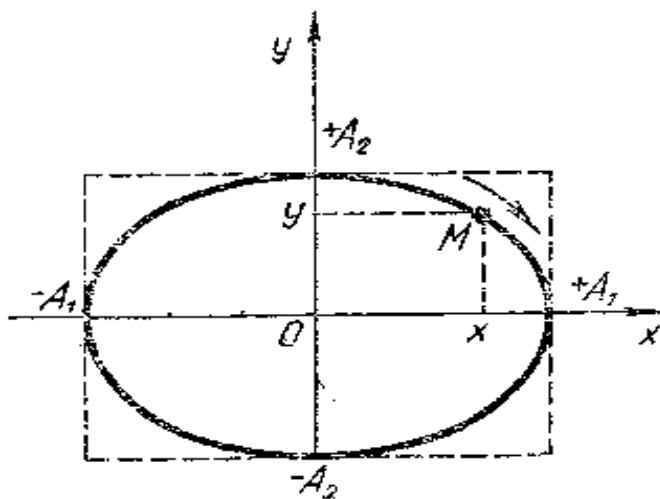


Рис 6

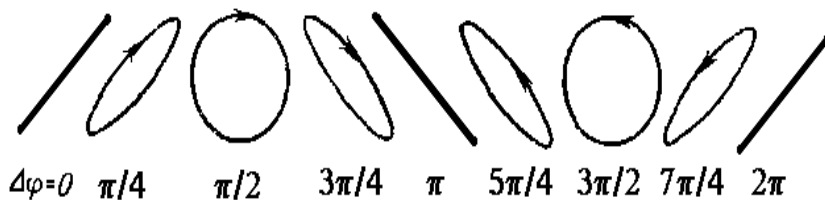


Рис.7

Составитель – проф. Михайлов С.П.

И.о. зав. кафедрой математики, физики и информатики \_\_\_\_\_ Р.А. Богданова

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Горно-Алтайский государственный университет»  
Физико-математический и инженерно-технологический институт (ФМИТИ)  
Кафедра математики, физики и информатики

**ФОНД  
ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

по учебной дисциплине  
**«Основы физического эксперимента»**

Уровень основной образовательной программы **бакалавриат**  
Для направления подготовки 03.03.02 «Физика»  
Профиль подготовки «Альтернативная энергетика»

Составитель – к.ф.-м.н., проф. Михайлов С.П.



Утвержден на заседании кафедры  
« 09 » 03 2023 г., протокол № 9

И.о. зав. кафедрой



Р.А. Богданова

**Горно-Алтайск 2023**



## Пояснительная записка

1. Оценочные средства предназначены для контроля и оценки образовательных достижений обучающихся, освоивших программу учебной дисциплины.

2. **Фонд оценочных средств включает** контрольные материалы для проведения текущего и промежуточного контроля в формах, указанных ниже.

### Перечень важнейших понятий дисциплины (гlossарий).

Физика. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Компьютерная модель. Экспериментальная, теоретическая и вычислительная физика.

Измерение, его роль в физике и технике. Системы единиц. Основные единицы СИ. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Три вида и два типа погрешностей. Расчёт систематической погрешности прямых измерений; класс точности. Расчёт случайной погрешности прямых измерений; стандартное отклонение среднего, коэффициенты Стьюдента. Расчёт погрешности косвенных измерений.

Условные обозначения в электрических схемах и стандартные элементы электрических цепей. Электроизмерительные приборы; три системы. Включение и расчёт шунта и добавочного сопротивления. Схема включения и настройка омметра. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов.

Источники тока физической лаборатории; их характеристики. Устройство и принцип действия электронного и цифрового осциллографов; их характеристики.

Механика. Механика Ньютона (классической механики). Основные абстрактные понятия механики: частица, твёрдое тело (ТТ), система отсчёта, сплошная среда. Описание положения частицы в координатной, векторной и естественной форме; связь этих форм. Кинематика частицы. Координатная, векторная и естественная форма описания движения частицы.

Динамика. Основные понятия динамики: сила, масса, импульс. Инерциальная система отсчёта; принцип относительности Галилея. Три закона Ньютона; формы записи второго закона. Равнодействующая сил. Две задачи динамики. Три силы классической механики: гравитация и сила тяжести; сила упругости и вес; силы сухого и вязкого трения

### Критерии оценки:

- оценка «отлично» выставляется студенту, если студент свободно и без ошибок владеет важнейшими понятиями гlossария.

- оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент свободно, но с небольшими ошибками владеет важнейшими понятиями гlossария.

- оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент частично и с ошибками владеет важнейшими понятиями гlossария.

- оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если студент не владеет важнейшими понятиями гlossария.

### Вопросы теоретического собеседования в ходе выполнения лабораторных работ.

Работа № 1. Измерение объемов тел с помощью штангенциркуля и микрометра и обработка результатов измерений.

1. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей.

2. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.

Работа № 2а. Определение коэффициента вязкости (внутреннего трения) жидкости методом Стокса.

1. Вязкость жидкостей и газов. Коэффициент вязкости. Ламинарное и турбулентное течение. Число Рейнольдса. Формула Стокса.
2. Объяснить вывод формулы определения коэффициента вязкости.

**Работа № 2б. Определение размеров микроскопических (броуновских) частиц методом наблюдения их распределения в поле тяжести.**

1. Распределение Больцмана.
2. Объяснить получение формулы для определения объема микроскопических (броуновских) частиц.

**Работа № 3. Электрические измерения.**

1. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей.
2. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.
3. Электроизмерительные приборы. Системы электроизмерительных приборов: принцип действия, устройство, особенности применения.
4. Шунт и добавочное сопротивление: их расчёт. Многопредельные электроизмерительные приборы.
5. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.

**Работа № 4. Изучение электронного осциллографа.**

1. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.
2. Блок-схема электронного осциллографа, назначение блоков.
3. Принцип действия электронного осциллографа.

**Работа № 5. Источники тока.**

1. Прямые и косвенные измерения. Погрешность. Виды и типы погрешностей.
2. Оценка точности измерения. Способы исключения промахов. Вычисление максимальной и наиболее вероятной погрешности прямых и косвенных измерений.
3. Источники переменного и постоянного тока: принцип действия, устройство, особенности применения.
4. Элементы электрических схем. Обозначения в электрических схемах.

**Критерии оценки:**

- оценка «отлично» выставляется студенту, если студент полностью владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания и теоретический вопрос раскрыт полностью.
- оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент свободно владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, но теоретический вопрос раскрыт не полностью.
- оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент частично владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, и теоретический вопрос раскрыт не полностью.
- оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если студент не владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, и не раскрыт теоретический вопрос.

**Перечень отрабатываемых в лаборатории экспериментальных и практических умений**

**Работа № 1. Измерение объемов тел с помощью штангенциркуля и микрометра и обработка результатов измерений.**

1. Измерить линейную величину с помощью линейки, штангенциркуля и микрометра, измерительного микроскопа. Оценить погрешность измерения.
2. По результатам линейных замеров найти объем предложенного тела. Оценить погрешность измерения.

**Работа № 2а. Определение коэффициента вязкости (внутреннего трения) жидкости методом Стокса.**

1. Измерить коэффициент вязкости (внутреннего трения жидкости) методом Стокса. Оценить погрешность измерения.

### **Работа № 2б. Определение размеров микроскопических (броуновских) частиц методом наблюдения их распределения в поле тяжести.**

1. Измерить размеры микроскопических частиц методом наблюдения и распределения в поле тяжести. Оценить погрешность измерения.

### **Работа № 3. Электрические измерения.**

1. С помощью авометра определить напряжение на клеммах источника питания; определить сопротивление своего тела, взяв проводники авометра руками.

2. С помощью школьного демонстрационного гальванометра измерить напряжение источника питания; измерить ток через реостат, подключенный к этому источнику.

3. В собранной преподавателем или лаборантом электрической цепи объяснить назначение всех элементов, начертить схему этой цепи и добиться горения лампочки (в том числе найдя с помощью омметра место обрыва, устранив неверно включенные элементы и т.п.).

4. Через реостат подключить к источнику питания катушку с неизвестным сопротивлением и с помощью закона Ома рассчитать это сопротивление. Найти максимальную погрешность измерения. Результат проверить прибором ММВ.

### **Работа № 4. Изучение электронного осциллографа.**

1. Проверить готовность электронного осциллографа к работе.

2. Используя в качестве источников переменного тока звуковой генератор и В-24 (или РНШ), получить на экране осциллографа фигуры Лиссажу для нескольких отношений частот.

3. Подав от генератора ГЗШ сигналы разной частоты (50, 200, 500 Гц) и амплитуды (выходы 5, 600 и 2000 Ом), получить на экране осциллографа устойчивое изображение одного периода синусоиды примерно одной амплитуды.

4. Продемонстрировать сигнал развёртки.

### **Работа № 5. Источники тока.**

1. Найти на столах источник тока по его условному обозначению на схеме и объяснить назначение; для предложенного преподавателем источника тока нарисовать обозначение в схемах и объяснить назначение.

2. С помощью авометра определить наибольшие напряжения на всех клеммах источников тока В-24; ВС 4-12 и РНШ; ВУП; ГЗШ. Определить максимальную погрешность измерения.

3. Подключив к источнику постоянного тока реостат с известным сопротивлением, по двум измерениям тока нагрузки рассчитать ЭДС и внутреннее сопротивление источника. Взять такие источники: ВС 4-12 (допустим ток до 2 А); В-24 (допустим ток до 10 А); ВУП на выходе  $0 \pm 100$  В (допустим ток до 10 мА); щелочная аккумуляторная батарея (допустим ток 2-3 А). Оценить максимальную погрешность измерения.

4. Правильно выбирая пределы измерений и частоту развёртки, с помощью осциллографа ОЭШ получить и зарисовать в тетрадь устойчивое изображение сигналов на всех выходах следующих источников тока: В-24 и аккумуляторной батареи; ВС 4-12 и РНШ; ВУП, ГЗШ. Указать, какие из выходов постоянного напряжения выпрямителей являются одно- или двухполупериодными; какие дают фильтрованное напряжение.

### **Критерии оценки:**

- оценка «отлично» выставляется студенту, если студент полностью владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, и умение показано без замечаний.

- оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент свободно владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, но умение показано с замечаниями.

- оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент частично владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, и умение показано с замечаниями.

- оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если студент не владеет важнейшими понятиями, выделенными для заучивания, и умение не показано.

## **ВОПРОСЫ СОБЕСЕДОВАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, ПРОПУСКАВШИХ ЛЕКЦИИ.**

Собеседование обязательно для студентов, по любой причине пропустивших хотя бы половину лекции. От них нужно:

- а) иметь переписанный текст пропущенных лекций;
- б) быть готовым ответить на один из 7 вопросов.
  1. Три вида и два типа погрешностей.
  2. Расчёт систематической и случайной погрешности прямых измерений.
  3. Расчёт погрешности косвенных измерений.
  4. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов.
  5. Условные обозначения в электрических схемах.
  6. Устройство и принцип действия электронного осциллографа.
  7. Что видно на экране осциллографа при отношении частот развёртки и синусоидального исследуемого сигнала 2:3, 3:2 и т.п.?

### **Критерии оценки:**

- оценка «отлично» выставляется, если студент полностью и правильно раскрыл вопросы;
- оценка «хорошо» выставляется, если студент не полностью раскрыл вопросы, или не везде правильно;
- оценка «удовлетворительно» выставляется, если студент не полностью раскрыл вопросы и не везде правильно;
- оценка «неудовлетворительно» выставляется, если ответы на вопросы не даны.