

Министерство образования и науки Российской Федерации

Владивостокский государственный университет  
экономики и сервиса

---

# **ФИЗИКА**

Лабораторный практикум

Владивосток  
Издательство ВГУЭС  
2005

ФИЗИКА: Лабораторный практикум / А.И. Олейник,  
Ф 48 Л.Р. Родкина, А.И. Шавлюгин, Е.Э. Шмакова. –  
Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2005. – 100 с.

Настоящее издание представляет собой переработанное и адаптированное для целей учебного процесса во ВГУЭС описание лабораторных работ из «Виртуального лабораторного практикума по физике для вузов», разработанного фирмой «Физикон» (Ю.В. Тихомиров. Лабораторные работы по курсу физики с компьютерными моделями: Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений дневной, вечерней и заочной (дистанционной) форм обучения. – М., 2002).

Практикум содержит описания 21 лабораторной работы, которые разделены на 4 части в соответствии с традиционной структурой курса физики. Описание каждой работы помимо методической части включает в себя еще и краткое теоретическое содержание рассматриваемого в работе явления.

Рассчитано на студентов всех специальностей и всех форм обучения, в учебных планах которых предусмотрено выполнение лабораторных работ по физике.

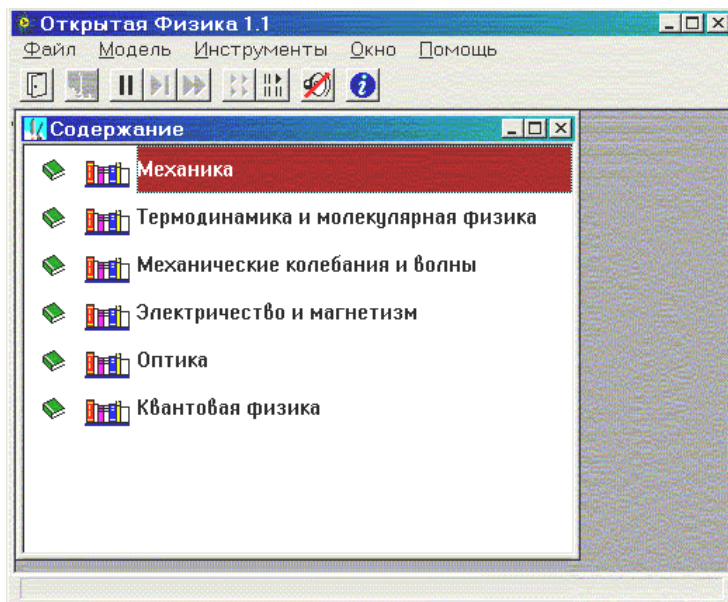
Печатается по решению РИСО ВГУЭС

ББК 22.3

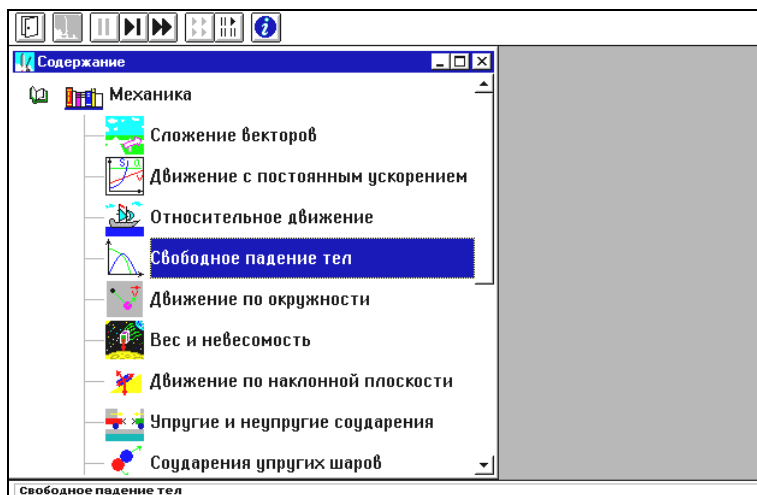
© Издательство Владивостокского  
государственного университета  
экономики и сервиса, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Для начала выполнения любой лабораторной работы нужно запустить «Виртуальный практикум», либо дважды щелкнув левой кнопкой мыши по находящемуся на «Рабочем столе» ярлыку «Открытая физика 1.1», либо выбрав эту программу из меню кнопки «Пуск». После этого на экране появится начальная картинка, имеющая вид



После этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, установив ее маркер над названием раздела, в котором расположена данная модель. В случае выбора раздела «Механика» на экране появится следующая картинка



Чтобы увидеть дальнейшие пункты содержания данного раздела, надо щелкать левой кнопкой мыши, установив ее маркер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу внутреннего окна.

Кнопки сверху картинки являются служебными. Предназначение каждой можно узнать из всплывающей подсказки, которая появляется, когда маркер мыши располагается на кнопке в течение 1–2 секунд (без нажатия кнопок мыши).

При выборе того или иного пункта меню любого раздела (для этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по соответствующей надписи) будет загружена определенная компьютерная модель. Некоторые модели являются иллюстративными и просто демонстрируют то или иное физическое явление, другие позволяют проводить физические эксперименты. Помимо компьютерных моделей в каждом разделе программы представлены видеозаписи физических опытов. Служебные кнопки в верхней части окна любой модели позволяют вызвать теоретическую страницу и звуковое сопровождение. Перемещать окна можно, зацепив (нажав и удерживая левую кнопку) мышью заголовок окна (имеющий синий фон).

### **Допуск к лабораторной работе**

Для получения допуска к выполнению лабораторной работы:

1) каждый студент должен предварительно оформить свой персональный конспект данной лабораторной работы (см. соответствующие требования);

2) преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов;

3) студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно);

4) преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента.

### **Оформление конспекта для допуска к лабораторной работе**

Конспект для допуска к лабораторной работе готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку или на листах бумаги формата А4. Конспект должен содержать следующие части: титульный лист (образец см. ниже), краткую теорию, описание лабораторной установки, экспериментальные таблицы. При защите лабораторной работы конспект дополняется при необходимости расчетными таблицами и графиками в соответствии с описанием конкретной работы, а также полученными результатами и выводами. Шаблоны основных частей конспекта и требования к ним приведены ниже.

#### **1. Титульный лист (образец)**

Министерство образования и науки Российской Федерации	
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса	
Институт информационных технологий и технических систем	
Кафедра физики, химии и прикладной механики	
<b>ОТЧЕТ</b>	
<b>ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № _____</b>	
по дисциплине «Физика»	
(название работы) _____	
Студент	
гр. _____	_____ (ФИО)
Преподаватель	
	_____ (ФИО)
Владивосток (дата)	

2. **Цель работы** необходимо выписать из описания соответствующей работы. Краткая теория к лабораторной работе должна содержать основные законы и формулы соответствующих разделов учебника или конспекта лекций. Установку следует изобразить на рисунке с расшифровкой основных узлов. Состав и количество таблиц и графиков определяется согласно описанию выполняемой лабораторной работы.

3. **Графики** должны удовлетворять следующим требованиям:

- а) размер графика – не менее половины тетрадного листа;
- б) оси должны быть обозначены с указанием единиц измерения и при необходимости масштабного множителя;
- в) масштаб следует выбирать равномерным;
- г) все графики необходимо выполнять с помощью чертежных инструментов или на компьютере.

4. **Вывод по графику (шаблон)**

«Полученный экспериментально график зависимости (название функции) от (название аргумента) имеет вид (прямой, параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид (формула)»

5. **Ответ (шаблон)**

«По результатам измерений и расчетов получено значение (название физической характеристики), равное (значение величины в нормальной форме (с порядком) плюс-минус погрешность)»

6. **Вывод по ответу (шаблон)**

«Полученное экспериментально значение величины (название физической характеристики) с точностью до ошибки измерений, составляющей (значение погрешности), совпадает (не совпадает) с теоретическим значением данной величины, равным (теоретическое значение)»

# 1. МЕХАНИКА

## Лабораторная работа №1.1 ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 1, §§ 3, 4 или [2], §§ 1–3). Запустите программу. Выберите «Механика» и «Свободное падение тел». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### Цель работы

1. Знакомство с применением физической модели «материальная точка» (МТ).
2. Исследование движения МТ с постоянным ускорением.
3. Экспериментальное определение ускорения свободного падения на поверхности Земли.

### Краткая теория

Материальная точка – это абстрактный объект (модель), не имеющий размеров, но обладающий другими характеристиками реального тела.

Положение МТ – это координата, которую имеет МТ в данный момент времени. Математическое описание положения МТ – ее радиус-вектор  $\vec{r}(t)$ .

Механическое движение есть изменение положения тела в пространстве со временем. Закон движения – это функция

$$\vec{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}.$$

Скорость есть векторная кинематическая характеристика движения, показывающая быстроту и направление движения. Математически

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt}. \quad (1.1.1)$$

Ускорение есть векторная кинематическая характеристика движения, показывающая быстроту и направление изменения скорости. Математически

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}. \quad (1.1.2)$$

Траектория есть геометрическое место точек, которые проходит МТ при ее движении. В каждой точке вектор скорости направлен по касательной к траектории.

Для движения с постоянным ускорением закон движения

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_o + \vec{v}_o t + \frac{\vec{a}t^2}{2}, \quad (1.1.3)$$

где  $\vec{r}_o$  – начальное положение и  $\vec{v}_o$  – начальная скорость МТ.

Закон изменения скорости:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_o + \vec{a}t. \quad (1.1.4)$$

При свободном движении тела вблизи поверхности Земли  $\vec{a} = \vec{g}_0$  – ускорению свободного падения.

Тангенциальное ускорение показывает, как быстро меняется величина скорости  $a_t = \frac{d|\vec{v}|}{dt}$ ; оно направлено по касательной к траектории.

Нормальное ускорение показывает, как быстро меняется направление вектора скорости  $a_n = \frac{v^2}{R}$  ( $R$  – радиус кривизны траектории). Оно перпендикулярно касательной.

Полное ускорение определяется по теореме Пифагора:  
 $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$ .

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

Если “Стробоскоп” включен, выключите его, установив маркер мыши на квадрат с меткой и нажав (коротко) на левую кнопку мыши.

Нажмите мышью кнопку «Старт». Внимательно рассмотрите картинку в средней части монитора. Найдите регуляторы с движками, задающие высоту  $H$ , начальную скорость  $v_0$  и угол бросания  $\alpha$ . Подведите маркер мыши к движку регулятора высоты, нажмите и, удерживая левую кнопку мыши, двигайте мышь вправо. Движок регулятора будет двигаться за маркером мыши. Доведите его до положения, соответствующего высоте  $H$ , указанной в таблице 1.1.1 для вашего варианта. Тем же методом, зацепив мышью и двигая движок регулятора или щелкая мышью по стрелке на движке, установите значения угла бросания, указанные в табл. 1.1.1 (см. ниже) для вашего варианта.

На мониторе щелкните мышью кнопку «||» в верхнем ряду кнопок. Нажмите клавишу пробела на клавиатуре компьютера.



Таблица 1.1.1

**Начальные параметры траекторий**

Номер варианта	Начальная высота $H$ , (м)	Начальный угол $\alpha$ (град)
1	10	60
2	30	60
3	50	60
4	60	60
5	10	45
6	30	45
7	50	45
8	60	45

Нажимайте мышью несколько раз кнопку «▶|» вверх окна и, когда МТ будет в верхней точке траектории (вертикальная компонента скорости  $v_y$  должна быть очень мала), запишите в конспект значение высоты, показанное в табличке на экране.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

**Измерения**

1. Приступайте к измерениям на первой траектории. Установите значение начальной скорости  $v_0$ , указанное в табл. 1.1.2.

2. Щелкните мышью кнопку «||» в верхнем ряду кнопок. Нажмите клавишу пробела на клавиатуре компьютера.

3. Нажимайте мышью несколько раз кнопку «▶|» вверх окна и, когда МТ будет в верхней точке траектории (вертикальная компонента скорости  $v_y$  должна быть минимальна), запишите результаты измерений координаты  $y_{\max}$  в табл. 1.1.2, образец которой приведен ниже. Нажмите кнопку «▶▶».

4. Установите начальную скорость движения для следующей траектории.

5. Проведите измерения  $y_{\max}$  по пунктам 2 и 3.

6. Повторите действия по пунктам 4 и 5.

Таблица 1.1.2

## Результаты измерений

Номер измерения	Траектория 1, $v_0 = 15 \text{ м/с}$		Траектория 2, $v_0 = 17 \text{ м/с}$		Траектория 3, $v_0 = 19 \text{ м/с}$		Траектория 4, $v_0 = 22 \text{ м/с}$		Траектория 5, $v_0 = 25 \text{ м/с}$	
	$y_{\text{max}}$	$\Delta y_{\text{max}}$	$y_{\text{max}}$	$\Delta y_{\text{max}}$	$y_{\text{max}}$	$\Delta y_{\text{max}}$	$y_{\text{max}}$	$\Delta y_{\text{max}}$	$y_{\text{max}}$	$\Delta y_{\text{max}}$
1										
2										
3										
4										
5										
$\langle y_{\text{max}} \rangle$										
$\Delta$										

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в табл. 1.1.2 средние значения вертикальной координаты точки максимального подъема  $\langle y_{\text{max}} \rangle$  и отклонения  $\Delta y_{\text{max}}$  измеренного значения от среднего.

2. Постройте график зависимости средних значений вертикальной координаты точки максимального подъема  $\langle y_{\text{max}} \rangle$  от квадрата начальной скорости.

3. Определите по графику значение ускорения свободного падения  $g$ , используя формулу

$$g = \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \frac{\Delta(v_0^2)}{\Delta(y_{\text{max}})}. \quad (1.1.5)$$

4. Вычислите ошибку среднего значения  $g$ .

5. Запишите ответ и проанализируйте ответ и график.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение МТ.
2. Как определяется положение МТ?
3. Дайте определение системы отсчета.

4. Что такое декартова система координат?
5. Дайте определение механического движения.
6. Что такое скорость материальной точки?
7. Дайте определение ускорения МТ?
8. Что такое траектория движения МТ?
9. Что такое закон движения?
10. Запишите закон движения МТ с постоянным ускорением.
11. Запишите закон изменения скорости для движения МТ с постоянным ускорением.
12. Дайте определение пути при произвольном движении МТ.
13. Напишите формулу для вычисления пути при произвольном движении МТ.
14. Дайте определение средней скорости. Напишите формулу для ее вычисления.
15. Дайте определение тангенциального ускорения.
16. Дайте определение нормального ускорения.
17. Напишите формулу для вычисления величины полного ускорения по известным тангенциальному и нормальному ускорениям.
18. Как движется МТ, если ускорение остается все время направленным вдоль скорости?
19. Как движется МТ, если ускорение все время остается направленным перпендикулярно скорости?
20. Как движется МТ, если скорость все время направлена вдоль радиус-вектора?
21. Как движется МТ, если скорость все время направлена перпендикулярно радиус-вектору?

## **Лабораторная работа № 1.2**

### **ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОЙ СИЛЫ**

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 1, §§ 8, 9, 13, 15, 17 или [2], §§ 5–8). Запустите программу. Выберите «Механика» и «Движение по наклонной плоскости». Нажмите вверх внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

#### **Цель работы**

1. Выбор физической модели для анализа движения тела.
2. Исследование движения тела под действием постоянной силы.
3. Экспериментальное определение свойств сил трения покоя и скольжения.
4. Экспериментальное определение массы тела.

## Краткая теория

Динамика – часть механики, изучающая связь движения тела с причинами, которые его вызвали.

Динамические характеристики – это такие характеристики движения, быстрота изменения которых (производная по времени) пропорциональна определенной характеристике внешнего воздействия. Одной из динамических характеристик движения МТ является импульс  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

Второй закон Ньютона (иногда его называют «уравнением движения тела»)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{F}. \quad (1.2.1)$$

Если масса тела остается постоянной, то второй закон Ньютона можно записать в виде

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}. \quad (1.2.2)$$

Сила трения скольжения возникает при соприкосновении двух поверхностей тел и наличии движения одной поверхности относительно другой. Эта сила всегда направлена противоположно вектору скорости, а ее абсолютная величина пропорциональна силе нормальной реакции

$$F_{тр} = kN. \quad (1.2.3)$$

## Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы.

Зарисуйте поле движения тела с регуляторами соответствующих параметров (укажите, что они регулируют).

Щелкните мышью кнопку «Старт» в верхнем ряду кнопок.

Внимательно рассмотрите картинку на экране монитора. Нажав мышью, снимите метку около надписи «Тело закреплено». Установите с помощью движков регуляторов угол наклона плоскости и значение внешней силы, равные нулю. Установите первое значение коэффициента трения, указанное в табл. 1.2.1 для вашего варианта.

Нажимая мышью на кнопку регулятора внешней силы на экране монитора, следите за движением квадратика на оси силы графика силы трения (справа вверху) и за поведением кубика. Потренируйтесь, устанавливая новое значение внешней силы после завершения движения кубика и снимая фиксацию (убирая метку).

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

Таблица 1.2.1

**Значения коэффициентов трения покоя**

Номер варианта	$m$ (кг)	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
1	2.2	0.08	0.13	0.18
2	2.4	0.07	0.12	0.17
3	2.6	0.06	0.11	0.16
4	3	0.05	0.1	0.15
5	2.9	0.05	0.1	0.15
6	2.7	0.06	0.11	0.16
7	2.5	0.07	0.12	0.17
8	2.1	0.08	0.13	0.18

**Измерения**

Приступайте к измерениям, начиная с положительных и малых (около  $0.05mg$ ) значений внешней силы и изменяя ее на  $0.05mg$ . Выставив значение силы, снимайте фиксацию и наблюдайте поведение кубика. Величину силы трения и ускорения определяйте по таблице вверху экрана. Результаты измерений силы трения и ускорения записывайте в табл. 1.2.2, образец которой приведен ниже. Повторите измерения для трех других значений коэффициента трения из табл. 1.2.2.

Таблица 1.2.2

**Результаты измерений (число измерений равно 10)**

Номер измерения	$\mu_1 =$			$\mu_2 =$			$\mu_3 =$		
	$F$ (Н)	$F_{mp}$ (Н)	$a$ ( $\frac{M}{c^2}$ )	$F$ (Н)	$F_{mp}$ (Н)	$a$ ( $\frac{M}{c^2}$ )	$F$ (Н)	$F_{mp}$ (Н)	$a$ ( $\frac{M}{c^2}$ )
1									
2									
...									
$m$ (кг)									

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Постройте на одном чертеже графики зависимости силы трения от внешней силы и ускорения от внешней силы.

2. По тангенсу угла наклона прямой  $a = f(F)$  определите значение  $m$ , используя формулу

$$m = \frac{\Delta F}{\Delta a}. \quad (1.2.4)$$

3. Вычислите среднее значение  $m$  и абсолютную ошибку среднего значения  $m$ .

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что изучает динамика?
2. Что такое масса?
3. Что такое инертность?
4. Дайте определение импульса.
5. Сформулируйте свойство аддитивности импульса.
6. Что такое сила?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции сил.
8. Сформулируйте третий закон Ньютона.
9. Сформулируйте условия, при которых ускорение прямо пропорционально силе.
10. Запишите формулу второго закона Ньютона при условии, что массу МТ можно считать постоянной.
11. Напишите формулу для вычисления скорости тела по заданной силе.
12. Напишите формулу для определения закона движения тела по заданной силе.
13. При каких условиях возникает сила трения скольжения?
14. Как направлена сила трения скольжения?
15. Напишите соотношение, определяющее величину силы трения скольжения.
16. Сформулируйте условия, при которых возникает сила трения покоя.
17. Как направлена сила трения покоя?
18. Чему равна величина силы трения покоя?
19. Напишите формулу, определяющую максимальное значение силы трения покоя.
20. Запишите формулу закона всемирного тяготения.
21. Запишите выражение для силы тяжести.
22. Выведите формулу для ускорения свободного падения на поверхности Земли  $g_0$ .

## Лабораторная работа № 1.3 МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 1, §§ 49, 50, 53, 58 или [2], §§ 140–142, 144–148). Запустите программу. Выберите «Механика», «Механические колебания и волны» и «Свободные колебания» (сначала математический маятник, потом груз на пружине). Нажмите вверх внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### Цель работы

1. Выбор физических моделей для анализа движения тел.
2. Исследование движения тела под действием квазиупругой силы.
3. Экспериментальное определение зависимости частоты колебаний от параметров системы.

### Краткая теория

Колебание – периодически повторяющиеся движения тела. Период  $T$  – минимальное время, через которое движение полностью повторяется.

Собственными называются колебания, возникающие в системе, выведенной из положения равновесия и предоставленной самой себе.

Вынужденными называются колебания, происходящие под действием периодической внешней силы.

Гармоническое колебание – движение, при котором координата тела меняется со временем по закону синуса или косинуса

$$A = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1.3.1)$$

Амплитуда  $A_0$  – максимальное значение параметра колеблющейся величины  $A$ .

Циклическая частота собственных колебаний  $\omega_0$  – величина в  $2\pi$  раз большая обычной или линейной частоты  $\nu = \frac{1}{T}$  ( $\nu$  – число полных колебаний за единицу времени).

Фаза колебаний  $\omega_0 t + \varphi_0$  равна аргументу косинуса.

Начальная фаза  $\varphi_0$  – значение аргумента косинуса при  $t = 0$ .

Дифференциальные уравнения свободных гармонических и затухающих колебаний имеют вид:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1.3.2)$$

и

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (1.3.3)$$

соответственно, где  $\beta$  – коэффициент затухания.

Математический маятник (ММ) и пружинный маятник (ПМ) – это модели объектов, в которых могут происходить гармонические колебания.

ММ – это материальная точка, подвешенная на идеальной (невесомой и нерастяжимой) нити.

ПМ – это материальная точка, прикрепленная к идеальной (невесомой и подчиняющейся закону Гука) пружине.

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунки, найдите все регуляторы и другие основные элементы. Зарисуйте поле движения тела с регуляторами соответствующих параметров (укажите, что они регулируют).

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

#### Эксперимент 1. Математический маятник

Выберите «Маятник». Установите с помощью движков регуляторов максимальную длину нити  $L$  и значения коэффициента затухания и начального угла, указанные в табл. 1.3.1 для вашего варианта.

Таблица 1.3.1

**Значения коэффициента затухания (вязкого трения), начального угла отклонения (для первого эксперимента) и начального отклонения (для второго эксперимента)**

Номер варианта	$\beta$ ( $\hat{e}\tilde{a}/\tilde{n}$ )	$\varphi_0$ ( $\tilde{a}\tilde{\delta}\tilde{\lambda}\tilde{\alpha}$ )	$x_0$ ( $\tilde{n}\tilde{i}$ )	$m$ ( $\hat{e}\tilde{a}$ )
1	0.8	20	10	0.5
2	0.6	18	9	0.6
3	0.4	16	8	0.7
4	0.2	14	7	0.8
5	0.08	14	7	0.7
6	0.07	16	8	0.8
7	0.06	18	9	0.9
8	0.05	20	10	1



Нажимая мышью на кнопку «Старт», следите за движением точки на графиках угла и скорости и за поведением маятника. Потренируйтесь, останавливая движение кнопкой «Стоп» (например в максимуме смещения) и запуская далее кнопкой «Старт». Выберите число полных колебаний  $N = 3 \div 5$  и измеряйте их продолжительность  $\Delta t$  (как разность  $t_2 - t_1$  из таблицы на экране).

Приступайте к измерениям длительности  $\Delta t$  для  $N = 3 \div 5$  полных колебаний, начиная с максимальной длины (150 см) нити маятника и уменьшая ее каждый раз на 10 см (до минимальной длины 80 см). Длину нити  $L$  и результаты измерений длительности  $\Delta t$  записывайте в табл. 1.3.2, образец которой приведен ниже.

Таблица 1.3.2

**Результаты измерений (число измерений равно 8)**

Номер измерения	$N =$			
	$L$ (м)	$\Delta t$ (с)	$T$ (с)	$T^2$ (с <sup>2</sup> )
1	1.5			
2	1.4			
...				
$g$ (м/с <sup>2</sup> )				

**Эксперимент 2. Пружинный маятник**

Выберите «Груз на пружине». Установите массу груза, значение коэффициента затухания и начальное смещение, указанные в табл. 1.3.1 для вашего варианта. Проведите измерения, аналогичные эксперименту 1, уменьшая коэффициент жесткости  $k$  каждый раз на 1 Н/м. Результаты измерений заносите в табл. 1.3.3, образец которой приведен ниже.

Таблица 1.3.3

**Результаты измерений (число измерений равно 6)**

Номер измерения	$N =$				
	$k$ (Н/м)	$\Delta t$ (с)	$T$ (с)	$\omega$ (с <sup>-1</sup> )	$\omega^2$ (с <sup>-2</sup> )
1	5				
2	6				
...					

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите требуемые величины и заполните табл. 1.3.2 и 1.3.3.
2. Постройте графики зависимости квадрата периода колебаний от длины нити ММ и квадрата циклической частоты колебаний от жесткости пружины ПМ.

3. По тангенсу угла наклона графика  $T^2 = f(L)$  определите значение  $g$ , используя формулу

$$g = 4\pi^2 \frac{\Delta(L)}{\Delta(T^2)}. \quad (1.3.4)$$

Оцените абсолютную ошибку определения  $g$ .

4. По тангенсу угла наклона графика  $\omega^2 = f(k)$  определите значение  $m$ , используя формулу

$$m = \frac{\Delta(k)}{\Delta(\omega^2)}. \quad (1.3.5)$$

Оцените абсолютную ошибку определения  $m$ .

5. Проанализируйте ответ и графики.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое колебание?
2. Дайте определение периода колебаний.
3. Дайте определение частоты колебаний.
4. Дайте определение гармонических колебаний.
5. Запишите закон зависимости от времени произвольной величины, совершающей гармоническое колебательное изменение.
6. Запишите закон движения МТ, совершающей гармонические колебания.
7. Дайте определение амплитуды гармонических колебаний.
8. Дайте определение фазы гармонических колебаний.
9. Дайте определение начальной фазы гармонических колебаний.
10. Напишите уравнение связи частоты и периода гармонических колебаний.
11. Напишите уравнение связи частоты и циклической частоты гармонических колебаний.
12. Напишите формулу зависимости скорости МТ от времени при гармонических колебаниях.
13. Напишите уравнения связи амплитуды скорости и амплитуды смещения при гармонических колебаниях МТ.

14. Напишите формулу зависимости ускорения МТ от времени при гармонических колебаниях.

15. Напишите уравнения связи амплитуды скорости и амплитуды ускорения при гармонических колебаниях МТ.

16. Напишите уравнения связи амплитуды смещения и амплитуды ускорения при гармонических колебаниях МТ.

17. Напишите дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний МТ.

18. Напишите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний МТ.

19. Дайте определение математического маятника.

20. Запишите формулу циклической частоты свободных колебаний математического маятника.

21. Дайте определение пружинного маятника.

22. Запишите формулу циклической частоты свободных колебаний пружинного маятника.

23. Что такое резонанс?

## **Лабораторная работа № 1.4 УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ УДАРЫ**

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 1, §§ 27, 28 или [2], § 15). Запустите программу. Выберите «Механика» и «Упругие и неупругие соударения». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### **Цель работы**

1. Выбор физических моделей для анализа взаимодействия двух тел.
2. Исследование физических характеристик, сохраняющихся при столкновениях.
3. Экспериментальное определение зависимости тепловыделения при неупругом столкновении от соотношения масс при разных скоростях.

### **Краткая теория**

Столкновение (удар, соударение) – модель взаимодействия двух тел, длительность которого равна нулю (мгновенное событие). Применяется для описания реальных взаимодействий, длительностью которых можно пренебречь в условиях данной задачи.

Абсолютно упругий удар – столкновение двух тел, после которого форма и размеры сталкивающихся тел восстанавливаются полностью до состояния, предшествовавшего столкновению. Суммарные импульс и

кинетическая энергия системы из двух таких тел сохраняются. Законы сохранения импульса и кинетической энергии для случая абсолютно упругого удара двух тел имеют вид:

$$m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2 = m_1 \bar{v}'_1 + m_2 \bar{v}'_2, \quad (1.4.1)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}, \quad (1.4.2)$$

где величины без штрихов соответствуют моменту времени непосредственно перед ударом, а со штрихами – сразу после него.

Абсолютно неупругий удар – столкновение двух тел, после которого форма и размеры тел не восстанавливаются, тела «слипаются» и движутся, как одно целое, с одной скоростью. Суммарный импульс двух неупруго сталкивающихся тел сохраняется, а кинетическая энергия становится меньше, так как часть энергии переходит в конечном итоге в тепловую. Скорость совместного движения тел после абсолютно неупругого удара можно найти при помощи закона сохранения импульса, из которого следует:

$$\bar{v}' = \frac{m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad (1.4.3)$$

Доля первоначальной кинетической энергии системы, переходящей в результате абсолютно неупругого удара в тепловую энергию, может быть вычислена по формуле

$$\delta = \frac{(1 - \beta)^2}{(1 + \frac{1}{\xi})(\xi + \beta^2)}, \quad (1.4.4)$$

где

$$\beta = \frac{v_2}{v_1}, \quad \xi = \frac{m_1}{m_2}. \quad (1.4.5)$$

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

#### *Эксперимент 1. Исследование абсолютно упругого удара*

Включите кнопку «Упругий» справа внизу. Установите, нажимая мышью на кнопки регуляторов, значение массы первой тележки  $m_1$  и ее начальную скорость  $v_1$ , указанные в табл. 1.4.1 для вашего варианта.

Для массы второй тележки выберите минимальное значение. Ее начальную скорость выберите равной  $v_2 = -v_1$ .

Таблица 1.4.1

**Исходные данные для первого и второго экспериментов**

Номер варианта	$m_1$ (кг)	$v_1$ (м/с)	Номер варианта	$m_1$ (кг)	$v_1$ (м/с)
1	1	1	5	5	1
2	2	2	6	6	2
3	3	1	7	7	1
4	4	2	8	8	2

Нажимая мышью на кнопку «СТАРТ» на экране монитора, следите за движением тележек, останавливая движение после первого столкновения кнопкой «СТОП». Результаты измерений необходимых величин записывайте в табл. 1.4.2, образец которой приведен ниже. Изменяя на 1 кг значение массы второй тележки, проведите измерения, количество которых указано в табл. 1.4.2.

Таблица 1.4.2

**Результаты измерений и расчетов для абсолютно упругого удара (количество измерений равно 10)**

Номер измерения	$m_1 = \text{_____}, v_1 = -v_2 = \text{_____}$				
	$m_2$ (кг)	$v'_1$ (м/с)	$v'_2$ (м/с)	$E$ (Дж)	$E'$ (Дж)
1	1				
2	2				
...					

**Эксперимент 2. Исследование абсолютно неупругого удара**

Нажмите кнопку «Неупругий» справа внизу. Установите, нажимая мышью на кнопки регуляторов, значение масс тележек и их начальные скорости, указанные в табл. 1.4.1 для вашего варианта. Проведите измерения, аналогичные эксперименту 1. Результаты запишите в табл. 1.4.3, образец которой приведен ниже.

Таблица 1.4.3

**Результаты измерений и расчетов для абсолютно неупругого удара  
(количество измерений равно 10)**

Номер измерения	$m_1 = \underline{\hspace{2cm}}, v_1 = -v_2 = \underline{\hspace{2cm}}$							
	$m_2$ (кг)	$v'$ (м/с)	$E$ (Дж)	$E'$ (Дж)	$\delta_{изм}$	$\delta_{рас}$	$\beta$	$\xi$
1	1						-1	
2	2						-1	
...							-1	

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Вычислите требуемые величины и заполните табл. 1.4.2 и 1.4.3.
2. Постройте график зависимости относительного значения тепловой энергии  $\delta$  от отношения  $\frac{\xi}{(1+\xi)^2}$  при  $\beta = -1$ .
3. Проанализируйте графики и сделайте выводы.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое удар (столкновение, соударение)?
2. Какое столкновение называют абсолютно неупругим?
3. Какое столкновение называют абсолютно упругим?
4. При каком столкновении выполняется закон сохранения импульса?
5. Дайте словесную формулировку закона сохранения импульса.
6. При каком столкновении выполняется закон сохранения кинетической энергии?
7. Дайте словесную формулировку закона сохранения кинетической энергии.
8. Дайте определение кинетической энергии.
9. Дайте определение потенциальной энергии.
10. Что такое полная механическая энергия.
11. Что такое изолированная система тел?
12. При каком столкновении выделяется тепловая энергия?
13. При каком столкновении форма тел восстанавливается?
14. При каком столкновении форма тел не восстанавливается?

## Лабораторная работа № 1.5 СОУДАРЕНИЯ УПРУГИХ ШАРОВ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 1, §§ 27, 28 или [2], § 15). Запустите программу. Выберите «Механика» и «Соударения упругих шаров». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### Цель работы

1. Выбор физических моделей для анализа взаимодействия двух шаров при столкновении.
2. Исследование физических характеристик, сохраняющихся при соударениях упругих шаров.

### Краткая теория

Удар (соударение, столкновение) – модель взаимодействия двух тел, длительность которого равна нулю (мгновенное событие). Применяется для описания реальных взаимодействий, длительностью которых можно пренебречь в условиях данной задачи.

Абсолютно упругий удар – столкновение двух тел, после которого форма и размеры сталкивающихся тел восстанавливаются полностью до состояния, предшествовавшего столкновению. Суммарные импульс и кинетическая энергия системы из двух таких тел сохраняются. Законы сохранения импульса и кинетической энергии для случая упругого столкновения двух тел имеют вид:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2, \quad (1.5.1)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}, \quad (1.5.2)$$

где величины без штрихов соответствуют моменту времени непосредственно перед ударом, а со штрихами – сразу после него.

Прицельное расстояние  $d$  есть расстояние между линией движения первого шара и параллельной ей линией, проходящей через центр второго шара.

Пусть второй шар до удара покоился, а первый двигался горизонтально вправо. Введем систему координат, направив ось  $OX$  вдоль вектора скорости первого шара до удара, а ось  $OY$  – вертикально вверх. Введем обозначения:  $\alpha_1$  – угол между вектором скорости первого шара после удара и осью  $OX$ ,  $\alpha_2$  – аналогичный угол для второго шара (углы, отсчитанные в направлении против часовой стрелки, будем считать

положительными, а в противоположном направлении – отрицательными). Проектируя закон сохранения импульса на оси системы координат, получаем следующие уравнения:

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' \cos \alpha_1 + m_2 v_2' \cos \alpha_2, \quad (1.5.3)$$

$$m_1 v_1' \sin \alpha_1 + m_2 v_2' \sin \alpha_2 = 0. \quad (1.5.4)$$

Решая систему уравнений (1.5.2)–(1.5.4), находим:

$$(v_1^2 - v_1'^2) = \frac{m_2}{m_1} v_2'^2 \quad (1.5.5)$$

$$(v_1 - v_1' \cos \alpha_1) = \frac{m_2}{m_1} v_2' \cos \alpha_2 \quad (1.5.6)$$

$$v_1' \sin \alpha_1 = -\frac{m_2}{m_1} v_2' \sin \alpha_2 \quad (1.5.7)$$

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

Рассмотрите картинку на экране. Установив прицельное расстояние  $d \approx 2R$  (минимальное расстояние, при котором не наблюдается столкновения), определите радиус шаров.

Установив прицельное расстояние  $0 < d < 2R$ , мышью нажмите кнопку “Старт” внизу экрана и наблюдайте процесс рассеяния при столкновении. Зарисуйте с экрана поле движения и все характеристики тел.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

Установите, двигая мышью движки регуляторов, массы шаров и начальную скорость первого шара (первое значение), указанные в табл. 1.5.1 для вашего варианта. Прицельное расстояние  $d$  выберите равным нулю. Нажимая мышью на кнопку «Старт» на экране монитора, следите за движением шаров. Результаты измерений необходимых величин записывайте в табл. 1.5.2, образец которой приведен ниже.

Измените значение прицельного расстояния  $d$  на величину  $0.2R$ , и повторите измерения.

Когда возможные значения  $d$  будут исчерпаны, увеличьте начальную скорость первого шара и повторите измерения, начиная с нулевого прицельного расстояния  $d$ . Результаты запишите в новую табл. 1.5.3, аналогичную табл. 1.5.2.



Таблица 1.5.1

**Массы шаров и начальные скорости**

Номер варианта	$m_1$ (кг)	$m_2$ (кг)	$v_1$ (м/с)	$v_1$ (м/с)
1	1	5	4	7
2	2	5	4	7
3	3	5	4	7
4	4	5	4	7
5	1	4	6	10
6	2	4	6	10
7	3	4	6	10
8	4	4	6	10

Таблицы 1.5.2. и 1.5.3

**Результаты измерений (количество измерений равно 10)**

Номер измерения	$m_1 = \text{---}(\text{кг}), m_2 = \text{---}(\text{кг}), v_1 = \text{---}(\text{м/с})$				
	$\frac{d}{R}$	$v_1'$ (м/с)	$v_2'$ (м/с)	$\alpha_1$ (град)	$\alpha_2$ (град)
1	0				
2	0.2				
...					

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Вычислите необходимые величины и заполните табл. 1.5.4 и 1.5.5.

2. Постройте графики зависимостей (на трех рисунках):

а) разности квадратов скоростей первого шара до и после удара как функции от квадрата скорости второго шара после удара  $(v_1^2 - v_1'^2) = f(v_2'^2)$ ;

б) разности проекций на ось ОХ скоростей первого шара до и после удара как функции от проекции на ОХ скорости второго шара после удара  $(v_1 - v_1' \cos \alpha_1) = f(v_2' \cos \alpha_2)$ ;

в) проекции на ось ОУ скорости первого шара после удара как функции от проекции на ОУ скорости второго шара после удара  $v'_1 \sin \alpha_1 = f(v'_2 \sin \alpha_2)$ .

3. По каждому графику определите отношение масс  $\frac{m_2}{m_1}$  шаров при помощи формул (1.5.5)–(1.5.7). Вычислите среднее значение этого отношения и абсолютную ошибку среднего.

Таблицы 1.5.4 и 1.5.5

**Результаты расчетов (количество измерений равно 10)**

Номер измерения	$m_1 = \text{_____}(\text{кг}), m_2 = \text{_____}(\text{кг}), v_1 = \text{_____}(\text{м/с})$					
	$v'_1 \cos \alpha_1$ (м/с)	$v'_1 \sin \alpha_1$ (м/с)	$v'_2 \cos \alpha_2$ (м/с)	$v'_2 \sin \alpha_2$ (м/с)	$v_1'^2$ (м/с) <sup>2</sup>	$v_2'^2$ (м/с) <sup>2</sup>
1						
2						
...						

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое удар (столкновение)?
2. Для какого взаимодействия двух тел можно применять модель столкновения?
3. Какое столкновение называют абсолютно упругим?
4. При каком столкновении выполняется закон сохранения импульса?
5. Дайте словесную формулировку закона сохранения импульса.
6. При каких условиях сохраняется проекция суммарного импульса системы тел на некоторую ось?
7. При каком столкновении выполняется закон сохранения кинетической энергии?
8. Дайте словесную формулировку закона сохранения кинетической энергии.
9. Дайте определение кинетической энергии.
10. Дайте определение потенциальной энергии.
11. Что такое полная механическая энергия.
12. Что такое изолированная система тел?
13. При каком столкновении выделяется тепловая энергия?
14. При каком столкновении форма тел восстанавливается?
15. При каком столкновении форма тел не восстанавливается?
16. Что такое прицельное расстояние (параметр) при столкновении шаров?

## 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Лабораторная работа № 2.1 АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 1, §§ 82, 97 или [2], § 55). Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Адиабатический процесс». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### Цель работы

1. Знакомство с компьютерной моделью, описывающей адиабатический процесс в идеальном газе.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей адиабатического процесса.
3. Экспериментальное определение показателя адиабаты, количества степеней свободы и структуры молекул газа в данной модели.

#### Краткая теория

Состояние системы имеет фиксированные значения макроскопических параметров, описывающих систему в целом. Параметры, характеризующие систему в целом, называются параметрами состояния. Примерами параметров состояния являются температура, давление, объем и т.д.

Равновесным называется такое состояние системы, при котором все параметры системы имеют определенные значения, остающиеся неизменными сколь угодно долго при неизменных внешних условиях.

Обратимым называется процесс, при реализации которого в обратном направлении система проходит через те же состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Равновесные процессы всегда обратимы.

Круговым процессом (циклом) называется процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

$$pV = \frac{m}{M} RT . \quad (2.1.1)$$

Теплоемкость тела численно равна отношению количества тепла  $dQ$ , сообщенного телу, к изменению температуры тела  $dT$ , которое при этом произошло

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (2.1.2)$$

Удельной теплоемкостью вещества называется теплоемкость единицы массы вещества. Молярной теплоемкостью называется теплоемкость одного моля вещества. Между удельной и молярной теплоемкостями имеется простая связь

$$c_{уд} = \frac{c_{МОЛ}}{M}. \quad (2.1.3)$$

Если тело не меняет свой объем, то оно не совершает работы, поэтому при постоянном объеме тела переданное ему тепло  $dQ$  идет на изменение внутренней энергии  $dU$ . Если тело находится при постоянном давлении, то его объем может меняться, поэтому в общем случае переданное телу тепло идет не только на изменение его внутренней энергии, но и на совершение работы.

Формулы молярной теплоемкости идеального газа имеют вид

$$c_v = \frac{i}{2} R, \quad c_p = \frac{i+2}{2} R, \quad (2.1.4)$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы.

Число степеней свободы есть минимальное количество независимых координат, необходимых для однозначного описания положения молекулы в пространстве или минимальное количество независимых движений, суперпозиция которых дает любое движение молекулы.

Отношение  $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$  является константой (в определенном диапазоне температур) для данного газа. Эта константа называется показателем адиабаты.

Формула

$$\gamma = 1 + \frac{2}{i} \quad (2.1.5)$$

устанавливает связь отношения теплоемкостей  $\gamma$  с числом степеней свободы молекулы газа  $i$ .

Поступательное движение обладает 3-мя степенями свободы. Вращательное движение дает 2 степени свободы для линейной молекулы и 3 степени свободы для молекулы, атомы которой не расположены на

одной прямой. Наконец, колебательное движение обладает  $2n$  степенями свободы, где  $n$  – число независимых колебаний атомов в молекуле.

Таким образом, при не очень высоких температурах, когда начинают возбуждаться колебательные степени свободы, молекулы одноатомного газа имеют 3 степени свободы, двухатомного – 5 степеней свободы и трехатомного – 6 степеней свободы.

Адиабатическим называется процесс, происходящий без теплообмена с внешней средой ( $dQ = 0$ ). Уравнение адиабаты (уравнение Пуассона) имеет вид

$$pV^\gamma = const . \quad (2.1.6)$$

Принято также выделять изотермический, изобарический и изохорический процессы.

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите картинку на рисунке, найдите рисунок элемента, в котором реализуется адиабатический процесс, обратите внимание на его теплоизоляцию. Найдите математическую формулировку условия теплоизоляции. Ознакомьтесь с графиками в правой части изображения.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Установите начальное значение объема  $V_{нач} = 40 \text{ дм}^3$  и начальную температуру  $T_1$  газа, близкую к числам из табл. 2.1.1. Для этого нажмите кнопку «Выбор», переместите маркер мыши так, чтобы его острие находилось в указанной точке вблизи границы столбика на градуснике, и коротко нажмите и, удерживая левую кнопку мыши, двигайте столбик.

2. Нажмите мышью кнопку «Старт» на экране и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по красной кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп». Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».

3. После автоматической остановки процесса запустите его снова, нажав кнопку «Старт», и останавливайте, нажимая кнопку «Стоп», когда крестик на теоретической адиабате (красная кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: 15, 20, 25, 30, 35 и 40  $\text{дм}^3$  (6 значений), записывая при остановке значения объема, температуры и давления в табл. 2.1.2.

4. Установите новое значение температуры  $T_2$ , взяв его из табл. 2.1.1, задавая  $V_{нач} = 40 \text{ дм}^3$ , и повторите измерения, записывая результаты в табл. 2.1.3.

Таблица 2.1.1

**Начальные значения температуры**

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1$ (K)	50	70	100	120	140	170	200	220
$T_2$ (K)	230	240	250	260	270	280	290	300

Таблицы 2.1.2 и 2.1.3

**Результаты измерений**

$T$ (K)								
$V$ (дм <sup>3</sup> )								
$p$ (кПа)								

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей логарифма давления от логарифма объема для обеих адиабат (указав на них начальные температуры).

2. Для каждой адиабаты определите по тангенсу угла наклона графика экспериментальное значение показателя, используя формулу

$$\gamma = - \frac{\Delta(\ln p)}{\Delta(\ln V)}.$$

3. Определите число степеней свободы молекулы газа, исследуемого в данной компьютерной модели, используя формулу (2.1.5).

4. Подберите распространенный газ, структура молекулы которого близка к наблюдаемой.

5. Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое параметры состояния системы?
2. Дайте определение равновесного состояния системы.
3. Какой процесс называется обратимым?

4. Что такое цикл?
5. Что такое уравнение состояния?
6. Для какого физического газа можно применить модель «идеальный газ»?
7. Какому уравнению подчиняется состояние идеального газа? Напишите его.
8. Дайте определение теплоемкости тела.
9. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости.
10. Напишите формулы молярной и удельной теплоемкостей идеального газа при постоянном объеме и постоянном давлении.
11. Что такое число степеней свободы? Чему оно равно для одноатомной молекулы?
12. Что такое показатель адиабаты?
13. Напишите формулу связи показателя адиабаты с числом степеней свободы молекулы идеального газа.
14. Дайте определение адиабатического процесса.
15. Напишите уравнение адиабатического процесса.
16. Дайте определение изопроцесса. Перечислите известные изопроцессы.
17. Напишите уравнение и нарисуйте  $PV$ -диаграмму изотермического процесса.
18. Напишите уравнение и нарисуйте  $PV$ -диаграмму изобарического процесса.
19. Напишите уравнение и нарисуйте  $PV$ -диаграмму изохорического процесса.

## **Лабораторная работа № 2.2** **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 1, §§ 93, 98, 99 или [2], §§ 43, 44). Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Распределение Максвелла». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

### **Цель работы**

1. Знакомство с компьютерной моделью, описывающей поведение молекул идеального газа
2. Экспериментальное подтверждение распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям.
3. Экспериментальное определение массы молекул в данной модели.

## Краткая теория

Вероятностью  $P_i$  получения некоторого результата измерения называется предел отношения количества измерений  $N_i$ , давших этот результат, к полному числу измерений  $N$ , когда  $N \rightarrow \infty$ .

Элементарной вероятностью  $dP_V$  при измерении величины скорости  $v$  называется вероятность получения значения скорости величиной от  $v$  до  $v + dv$ . Эта вероятность пропорциональна приращению скорости  $dv$ :  $dP_V = F(v)dv$ , где коэффициент пропорциональности  $F(v)$  называется функцией распределения молекул по величине скорости.

Установлено, что функция распределения молекул по скоростям имеет вид

$$F(v) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\left( \frac{mv^2}{2kT} \right)} 4\pi v^2. \quad (2.2.1)$$

При помощи приведенной формулы можно получить следующие выражения для различных средних скоростей:

$$\text{средняя арифметическая скорость } \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v F(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}; \quad (2.2.2)$$

$$\text{средняя квадратичная скорость } \langle v^2 \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}; \quad (2.2.3)$$

$$\text{наиболее вероятная скорость } v_{\text{ВЕР}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (2.2.4)$$

## Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Обратите внимание на систему частиц, движущихся в замкнутом объеме слева во внутреннем окне. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Их количество около 100 и данная система является хорошей «механической» моделью идеального газа. В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки «||» вверх) и получать как бы «мгновенные фотографии», на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном диапазоне  $\Delta v$  вблизи заданной скорости  $v$  (т.е., имеющие скорости от  $v$  до  $v + \Delta v$ ). Для продолжения наблюдения движения частиц надо нажать кнопку «▶▶». Запишите в тетрадь значение  $\Delta v$ , указанное на экране.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**



## Измерения

1. Нажмите кнопки «▶▶», «СТАРТ» и «ВЫБОР» и установите температуру  $T_1$ , указанную в табл. 2.2.1 для вашего варианта. Запишите для нее значение наиболее вероятной скорости.

2. Установите скорость выделенной группы молекул вблизи минимального заданного в табл. 2.2.2 значения.

3. Нажмите клавишу «||» и подсчитайте на «мгновенной фотографии» количество молекул  $\Delta N$ , скорости которых лежат в заданном диапазоне  $\Delta v$  вблизи заданной скорости молекул  $v$  (они более яркие). Результат запишите в табл. 2.2.2.

4. Нажмите кнопку «▶▶» и через 10–20 секунд получите еще одну мгновенную фотографию (нажав кнопку «||»). Подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результат запишите в табл. 2.2.2.

5. Повторите еще 3 раза измерения для данной скорости и результаты запишите в табл. 2.2.2.

6. Измените скорость до значения, указанного в табл. 2.2.2, и сделайте по 5 измерений для каждой скорости.

7. Установите второе значение температуры  $T_2$  из табл. 2.2.1. Запишите для нее значение наиболее вероятной скорости.

8. Повторите измерения (по пунктам 2,3,4,5), записывая результат в табл. 2.2.3, аналогичную табл. 2.2.2.

Таблица 2.2.1

### Примерные значения температуры

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1$ (K)	160	200	260	300	360	400	460	500
$T_2$ (K)	700	740	760	800	840	860	900	960

Таблицы 2.2.2, 2.2.3

### Результаты измерений

$v$ (км/с)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta N_1$							
$\Delta N_2$							


1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta N_3$							
$\Delta N_4$							
$\Delta N_5$							
$\Delta N_{CP}$							

### Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в таблицы средние значения количества частиц  $\Delta N_{CP}$ , скорости которых лежат в данном диапазоне скоростей.

2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных и теоретических зависимостей  $\Delta N_{CP}(v)$ . Теоретические зависимости можно срисовать с экрана монитора компьютера, подобрав соответствующий масштаб по оси ординат.

3. Для каждой температуры определите экспериментальное значение наиболее вероятной скорости молекул.

4. Постройте график зависимости квадрата наиболее вероятной скорости от температуры  $v_{BEP}^2$  .

5. По тангенсу угла наклона графика определите значение массы молекулы

$$m = 2k \frac{\Delta(T)}{\Delta(v_{BEP}^2)}.$$

6. Подберите газ, масса молекулы которого достаточно близка к измеренной массе молекулы.

7. Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения.

2. Дайте определение элементарной вероятности при измерении величины скорости.

3. Что такое функция распределения?

4. Каковы особенности графика функции распределения молекул идеального газа по скоростям?

5. Как вычисляется среднее значение некоторой физической величины  $A$ , если известна ее функция распределения  $f(A)$ ?

6. Напишите формулу для вычисления средней арифметической скорости молекул.

7. Напишите формулу для вычисления средней квадратичной скорости молекул.

8. Напишите условие для вычисления наиболее вероятной скорости молекул.

9. Напишите выражение для средней арифметической скорости молекул идеального газа.

10. Напишите выражение для средней квадратичной скорости молекул идеального газа.

11. Напишите выражение для наиболее вероятной скорости молекул идеального газа.

12. Вычислите, на сколько процентов отличаются средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул идеального газа.

13. Вычислите, на сколько процентов отличаются средняя арифметическая и наиболее вероятная скорости молекул идеального газа.

## **Лабораторная работа № 2.3** **ДИФFUЗИЯ В ГАЗАХ**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 1, §§ 128, 130 или [2], §§ 46, 48). Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Диффузия». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

### **Цель работы**

1. Знакомство с компьютерной моделью, описывающей диффузию молекул идеального газа.
2. Экспериментальное подтверждение закона диффузии.
3. Экспериментальное определение средней скорости теплового движения частиц в данной модели.

### **Краткая теория**

При нарушении равновесия макросистема стремится вернуться в равновесное состояние.

Явлениями переноса называются процессы, связанные с возникновением в веществе направленного переноса (потока) массы, импульса или внутренней энергии.

Диффузия есть процесс установления внутри фаз вещества равновесного распределения концентраций, который обеспечивается направ-

ленным переносом массы этого вещества. Диффузия обусловлена тепловым движением молекул и проявляется в самопроизвольном выравнивании концентраций в смеси нескольких веществ.

Самодиффузия имеет место при самопроизвольном выравнивании концентрации однородного вещества, если по некоторым причинам равновесное распределение концентрации было нарушено.

Длина свободного пробега  $\lambda$  есть среднее расстояние, пролетаемое частицей между двумя последовательными столкновениями. Эффективный диаметр частицы есть минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух сталкивающихся частиц.

Если в начальный момент времени имеет место неоднородное распределение плотности вещества  $\rho$  вдоль только одной оси (например ОХ), тогда возникает одномерная диффузия, связанная с переносом массы вдоль этой оси. Для двухкомпонентной системы (например смеси двух газов) одномерная диффузия описывается первым законом Фика:

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dS \cdot dt, \quad (2.3.1)$$

где  $dM$  – масса одного компонента (индексы для характеристик данного компонента пропущены), которая переносится за время  $dt$  через элементарную площадку, перпендикулярную оси ОХ, имеющую площадь  $dS$ , в направлении убывания плотности этого компонента,  $\frac{d\rho}{dx}$  – градиент плотности первого компонента,  $D$  – коэффициент диффузии.

Рассмотрим два одинаковых сосуда, в каждом из которых находятся частицы определенного вида (красные и зеленые, как в компьютерной модели). Сосуды соединены тонкой трубкой, массы частиц одинаковы. Анализ показывает, что концентрация частиц какого-либо вида изменяется со временем согласно уравнению

$$\frac{dN}{N_0 - 2N(t)} = -D \frac{S_{OTB}}{L_{OTB}V} dt, \quad (2.3.2)$$

где  $N_0$  – первоначальное число частиц,  $N(t)$  – число частиц в момент времени  $t$ ,  $S_{OTB}$  – площадь трубки,  $L_{OTB}$  – ее длина,  $V$  – объем каждого из сосудов. Интегрируя это дифференциальное уравнение, получаем закон изменения числа частиц со временем

$$N(t) = \frac{N_0}{2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2DS_{OTB}}{L_{OTB}V} t\right) \right]. \quad (2.3.3)$$

## Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок. Зарисуйте необходимое в концепт.

Обратите внимание на 2 системы частиц, находящихся в начальный момент в левом (красные) и в правом (зеленые) объемах. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Количество частиц  $N_0$  каждой компоненты равно 100 и данная система является хорошей “механической” моделью идеального газа.

Нажмите мышью кнопку «Старт» во внутреннем окне экрана.

В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки «| |» сверху во внешнем окне) и получать как бы “мгновенные фотографии”. Для продолжения наблюдений надо нажать кнопку «▶▶», расположенную сверху во внешнем окне. Количество частиц подсчитывается автоматически и высвечивается над соответствующими столбиками. Для установки нового диаметра трубки надо нажать «▶▶» сверху во внешнем окне и кнопки «Старт» и «Выбор» внизу во внутреннем окне.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

Установите значение  $d_1$  из табл. 2.3.1 для вашего варианта. Нажмите кнопку «Старт» и через  $\Delta t$  секунд после начала процесса перемешивания нажмите кнопку «| |» сверху во внешнем окне. Результат запишите в табл. 2.3.2. Нажмите кнопку «▶▶». Через  $\Delta t$  секунд, нажав «| |», получите еще одну “мгновенную фотографию” и запишите количество частиц.

Таблица 2.3.1

**Значения диаметров соединительной трубки, длительности промежутка измерения и сорта частиц**

Номер варианта	$d_1$ (мм)	$d_2$ (мм)	$\Delta t$ (с)	Сорт	Объем
1	10	20	15	красный	правый
2	12	22	15	зеленый	левый
3	14	24	15	красный	правый
4	16	26	15	зеленый	левый
5	10	28	10	красный	правый
6	12	30	10	зеленый	левый
7	14	32	10	красный	правый
8	16	34	10	зеленый	левый

Закончив измерения с данной трубкой, установите второе значение диаметра соединительной трубки  $d_2$  из табл. 2.3.1 и повторите измерения, записывая результат в табл. 2.3.3, аналогичную табл. 2.3.2.

Таблицы 2.3.2, 2.3.3

**Результаты измерений и расчетов (число измерений равно 10)**

$t$ (с)	$N(t)$	$1 - \frac{2N(t)}{N_0}$	$-\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)$
$\Delta t$			
$2\Delta t$			
...			

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Вычислите и запишите в таблицы все указанные значения.
2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей  $f(t) = -\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)$  и, используя формулу

$$D = -\frac{2L_{\text{отв}} V}{\pi d^2} \frac{\Delta\left(\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)\right)}{\Delta t}, \tag{2.3.4}$$

определите по тангенсам угла наклона графиков коэффициенты диффузии для каждого отверстия. Длину отверстия  $L_{\text{отв}}$  измерьте линейкой на экране монитора, объем сосуда  $V = 20 \text{ см}^3$ .

3. Найдите среднее значение коэффициента диффузии и, используя соотношение  $D = \frac{1}{3} v_{\text{ср}} \lambda_{\text{ср}}$ , найдите среднюю скорость теплового движения  $v_{\text{ср}}$  частиц ( $\lambda_{\text{ср}} = 2 \text{ см}$ ).

4. Сделайте выводы по графику и ответу. В выводе по ответу сравните полученное экспериментально значение  $v_{\text{ср}}$  с величиной скорости, оцененной «на глаз».

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что происходит с макросистемой при нарушении равновесия?
2. Дайте определение явления переноса.

3. Назовите примеры явлений переноса.
4. Дайте определение явления диффузии.
5. Чем обусловлена диффузия?
6. В чем проявляется диффузия?
7. Какая диффузия называется одномерной?
8. Что такое самодиффузия?
9. Напишите уравнение одномерной диффузии для двухкомпонентной системы газов.
10. Каков физический смысл коэффициента диффузии.
11. Что такое плотность тела?
12. Что такое концентрация молекул (частиц)?
13. Дайте определение градиента плотности в общем случае.
14. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси  $OX$ .
15. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси  $OY$ .
16. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси  $OZ$ .
17. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется вдоль осей  $OX$  и  $OY$ .
18. Что такое длина свободного пробега частицы?
19. Что такое эффективный диаметр и эффективное сечение частицы?
20. Какое уравнение связывает среднюю скорость с коэффициентом диффузии?

## **Лабораторная работа № 2.4**

### **УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 1, §§ 91, § 123, § 124 или §§ 61–63). Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Изотермы реального газа». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### **Цель работы**

1. Знакомство с компьютерной моделью, описывающей вещество в газообразном состоянии и его переход в жидкое состояние.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей поведения реального газа.

## Краткая теория

Физическим газом называется вещество, находящееся в газообразном состоянии.

Идеальный газ – это название модели, описывающей физический газ, находящийся в сильно разреженном состоянии (при не слишком больших давлениях и достаточно высоких температурах). Уравнением, связывающим параметры состояния идеального газа, является уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа), которое имеет вид

$$pV = \nu RT, \quad (2.4.1)$$

где  $p$  – давление газа,  $V$  – объем газа,  $\nu$  – количество вещества,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура газа.

Более точная модель физического (реального) газа была предложена Ван-дер-Ваальсом. Она также является приближенной, но лучше описывает процессы, нежели модель «идеальный газ». Иногда эту модель называют «реальный газ». Газом Ван-дер-Ваальса (ВдВ) называется воображаемый газ (модель), параметры состояния которого подчиняются уравнению

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT, \quad (2.4.2)$$

которое называется уравнением Ван-дер-Ваальса. Здесь  $a$  и  $b$  – константы Ван-дер-Ваальса.

Поправка к внешнему давлению  $a$  обусловлена взаимным притяжением молекул друг к другу, а поправка к объему  $b$  характеризует ту часть объема, которая недоступна для движения молекул. Она равна нескольким суммарным объемам молекул, содержащихся в газе.

Изотермой называется зависимость давления от объема данного (фиксированного) количества вещества при постоянной температуре.

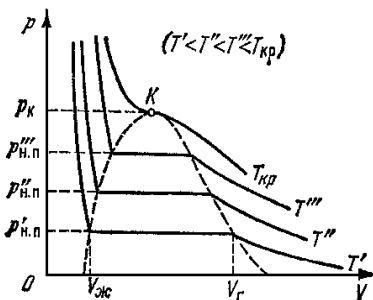


Рис. 2.4.1

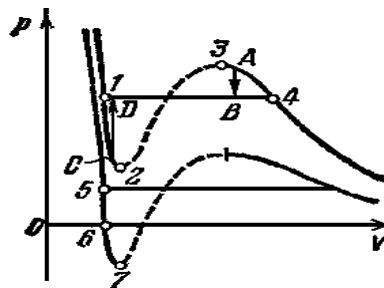


Рис. 2.4.2



На рис. 2.4.1 приведены изотермы некоторого физического (реального) газа, а на рис. 2.4.2 – изотермы ВдВ газа (взяты из учебника [1]).

Изотерма ВдВ газа, имеющая только точку перегиба и не имеющая экстремумов, называется критической. Температура критической изотермы называется критической температурой. Объем и давление в критической точке также называются критическими.

Критические параметры газа ВдВ связаны с константами, входящими в уравнение ВдВ согласно формулам:

$$V_{KP} = 3b, \quad p_{KP} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{KP} = T_{KP} = \frac{8a}{27R \cdot b}. \quad (2.4.3)$$

Из формул (2.4.3) следует

$$\frac{p_{KP} V_{KP}}{RT_{KP}} = \frac{3}{8} \nu = A. \quad (2.4.4)$$

При температуре выше критической вещество может находиться только в газообразном состоянии. При температуре ниже критической вещество может находиться как в газообразном, так и в жидком состоянии.

Жидкое состояние описывается левыми (по отношению к точке перегиба) частями графиков на рисунках и характерно тем, что небольшое уменьшение объема вещества может произойти только при резком увеличении давления (жидкость практически несжимаема).

Изотермы ВдВ примерно совпадают с изотермами реального газа на участках, соответствующих однофазным состояниям вещества.

Рис. 2.4.2 разъясняет поведение вещества при разных внешних условиях. В области, где присутствуют 2 фазы (1–2–3–4), S-образный завиток изотермы ВдВ заменяется горизонтальным участком (1–4) реальной изотермы.

Нереализуемое состояние соответствует участку 2–3, на котором сжимаемость  $\beta = \frac{dV}{dP}$  вещества была бы отрицательна, что невозможно.

Переохлажденный пар на участке 3–4 реализуется при определенных условиях (при практическом отсутствии центров конденсации и внешних воздействий).

Перегретая жидкость на участке 1–2 реализуется при отсутствии примесей, способных быть центрами кипения.

### **Методика и порядок измерений**

Рассмотрите внимательно рисунок и зарисуйте необходимое в свой конспект.

Нажмите мышью кнопку «Старт». Поработайте с моделью, меняя температуру.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

## Измерения

### Эксперимент 1. Определение критических параметров

1. Щелкните левой кнопкой мыши по кнопке «Выбор».

2. Подведите маркер мыши к кнопке у верхней границы столбика на регуляторе температуры и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом состоянии, перемещайте границу столбика до тех пор, пока на правом экране не появится критическая изотерма с точкой перегиба и без экстремумов.

3. Запишите в свой конспект значения критических параметров  $T_{KP}$ ,  $V_{KP}$ ,  $P_{KP}$ .

### Эксперимент 2. Исследование изотерм газа ВdВ

1. Установите значение температуры, указанное первым в табл. 2.4.1 для вашего варианта. Нажмите мышью кнопку «Старт» на экране и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по красной кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп» на экране. Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».

2. После остановки процесса запустите его снова, нажав кнопку «Старт», и останавливайте, нажимая кнопку «Стоп», когда крестик на теоретической изотерме (красная кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18 и 0.2  $\text{дм}^3$  (6 значений), записывая при остановке значения в табл. 2.4.2.

3. Установив новое значение температуры из табл. 2.4.1, повторите измерения, записывая результаты в табл. 2.4.3, 2.4.4 и 2.4.5, аналогичные табл. 2.4.2

Таблица 2.4.1

### Примерные значения температуры

Номер варианта	$T_1$ (K)	$T_2$ (K)	$T_3$ (K)	$T_4$ (K)
1	2	3	4	5
1	500	580	660	690
2	510	590	670	700

1	2	3	4	5
3	520	600	680	690
4	530	610	690	700
5	540	620	660	690
6	550	630	670	700
7	560	640	680	690
8	570	650	690	700

Таблицы 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5

**Результаты измерений и расчетов**

$V$ (см <sup>3</sup> )						
$p$ (кПа)						
$\frac{1}{V}$ (м <sup>-3</sup> )						

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. По измеренным значениям критических параметров вычислите константу  $A$  по формуле (2.4.4).

2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей давления от обратного объема для начальных точек всех изотермических процессов (указав на них температуры).

3. Для каждой изотермы по тангенсу угла наклона графика определите значение количества вещества по формуле

$$\nu = \frac{1}{RT} \frac{\Delta(p)}{\Delta\left(\frac{1}{V}\right)}. \quad (2.4.5)$$

4. Вычислите среднее значение  $\nu$  и величину константы  $A'$  по формуле  $A' = 0.375\nu$ . Запишите ответ для  $A'$  и проанализируйте ответы и графики. В выводах по ответу сравните  $A'$ , полученное по изотермам, с  $A$ , полученным через критические параметры.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое физический газ?
2. Перечислите все известные агрегатные состояния вещества.
3. Что такое идеальный газ?
4. При каких условиях физический газ можно описывать моделью идеальный газ?
5. Что такое уравнение состояния?
6. Как выглядит уравнение состояния идеального газа?
7. Что такое газ Ван-дер-Ваальса?
8. Как выглядит уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса?
9. Что определяют константы в уравнении Ван-дер-Ваальса?
10. Что такое изотерма?
11. Что такое критическая изотерма?
12. Каковы особенности поведения газа при температуре выше критической?
13. Каковы особенности поведения газа при температуре ниже критической?
14. На каких участках изотермы ВдВ примерно совпадают с изотермами реального газа?

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

#### Лабораторная работа № 3.1 ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 2, §§ 5, 73). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Движение заряда в электрическом поле». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

##### Цель работы

1. Знакомство с моделью процесса движения заряда в однородном электрическом поле.
2. Экспериментальное исследование закономерностей движения точечного заряда в однородном электрическом поле.
3. Экспериментальное определение величины удельного заряда частицы.

##### Краткая теория

Движение заряженных частиц в электрическом поле широко используется в современных электронных приборах, в частности, в электронно-лучевых трубках с электростатической системой отклонения электронного пучка.

Электрический заряд есть величина, характеризующая способность объекта создавать электрическое поле и взаимодействовать с электрическим полем.

Точечный заряд – это абстрактный объект (модель), имеющий вид материальной точки, несущей электрический заряд (заряженная МТ).

Электрическое поле – это то, что существует в области пространства, в которой на заряженный объект действует сила, называемая электрической.

Основными свойствами заряда являются:

- 1) аддитивность (суммируемость);
- 2) инвариантность (одинаковость во всех инерциальных системах отсчета);
- 3) дискретность (наличие элементарного заряда, обозначаемого  $e$ , и кратность любого заряда этому элементарному  $q = Ne$ , где  $N$  – любое целое число);
- 4) подчинение закону сохранения заряда (суммарный заряд электрически изолированной системы, через границы которой не могут проникать заряженные частицы, сохраняется);

5) наличие положительных и отрицательных зарядов (заряд величина алгебраическая).

Закон Кулона определяет силу взаимодействия двух точечных зарядов

$$\vec{F}_{12} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{12}, \quad (3.1.1)$$

где  $\vec{e}_{12}$  – единичный вектор, направленный от первого заряда  $q_1$  ко второму  $q_2$ .

Напряженностью называется векторная характеристика поля, численно равная отношению силы  $\vec{F}$ , действующей на точечный заряд, к величине  $q$  этого заряда

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (3.1.2)$$

Если задана напряженность электрического поля, тогда сила, действующая на заряд, будет определяться формулой  $\vec{F} = q\vec{E}$ .

Однородным называется поле, напряженность которого во всех точках одинакова как по величине, так и по направлению. Источником однородного поля может быть равномерно заряженная плоскость. Можно считать однородным поле, возникающее вдали от краев обкладок плоского конденсатора. Сила, действующая на заряженную частицу в однородном поле, везде одинакова, поэтому неизменным будет и ускорение частицы, определяемое вторым законом Ньютона. Рассмотрим заряженную частицу, влетающую с начальной скоростью  $v_0 = v_{0x}$  параллельно пластинам плоского конденсатора. Ось ОХ направим параллельно пластинам в сторону начальной скорости, а ось ОУ – перпендикулярно пластинам. Тогда движение вдоль оси ОХ, будет равномерным с первоначальной скоростью, а вдоль оси ОУ – равноускоренным. Если длина конденсатора равна  $l$ , а напряженность поля в нем  $E$ , то применяя формулы перемещения при равномерном и равноускоренном движениях, формулу мгновенной скорости для равноускоренного движения и второй закон Ньютона, получаем систему уравнений

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m} \vec{E}, \quad l = v_0 t, \quad y = \frac{at^2}{2}, \quad v_y = at, \quad (3.1.3)$$

решая которую, находим

$$y = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E \left( \frac{l}{v_0} \right)^2, \quad (3.1.4)$$

$$v_y = \frac{q}{m} E \frac{L}{v_0}. \quad (3.1.5)$$

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы.

Зарисуйте поле эксперимента и траекторию движения частицы. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте на экране движение частицы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Нажмите мышью кнопку «Выбор». Подведите маркер мыши к движку регулятора напряженности  $E$ . Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте  $E$ . Установите числовое значение  $E$ , равное взятому из табл. 3.1.1 для вашего варианта.

2. Аналогичным способом установите  $v_{0x} = 2 \cdot 10^6 \frac{M}{c}$ ,  $v_{0y} = 0$ . Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение частицы. Увеличивая  $v_{0x}$ , подберите минимальное значение, при котором частица вылетает из конденсатора. Запишите значение длины пластин конденсатора  $l$ .

3. Проведите измерения параметров движения частицы в момент вылета из конденсатора. Запишите числовые значения с экрана в табл. 3.1.2.

4. Повторите измерения по предыдущего пункта еще 5 раз, каждый раз увеличивая  $v_{0x}$  на  $0.2 \cdot 10^6 \frac{M}{c}$ . Результаты записывайте в табл. 3.1.2.

Таблица 3.1.1

### Напряженность электрического поля

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$E \left( \frac{B}{M} \right)$	100	200	300	400	-100	-200	-300	-400

Таблица 3.1.2

## Результаты измерений

$v_{0x} \left( \frac{\dot{h}}{\bar{n}} \right)$						
$y (\ddot{u} )$						
$x (\ddot{u} )$						
$t (\ddot{m} )$						
$v_x \left( \frac{\dot{h}}{\bar{n}} \right)$						
$v_x \left( \frac{\dot{h}}{\bar{n}} \right)$						

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Постройте на отдельных листах графики экспериментальных зависимостей:

а) вертикального смещения на вылете из конденсатора от квадрата обратной начальной скорости  $y = f\left(\frac{1}{v_{0x}^2}\right)$ ;

б) вертикальной составляющей скорости на вылете из конденсатора от обратной начальной скорости  $v_y = f\left(\frac{1}{v_{0x}}\right)$ .

2. Для каждого графика определите по тангенсу угла наклона экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулы

$$\frac{q}{m} = \frac{2}{El^2} \frac{\Delta(y)}{\Delta\left(\frac{1}{v_{0x}^2}\right)} \quad (3.1.6)$$

для первого и

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{El} \frac{\Delta(v_y)}{\Delta\left(\frac{1}{v_{0x}}\right)} \quad (3.1.7)$$

для второго.



3. Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного удельного заряда частицы.

4. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу и графикам.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определение электрического заряда.
2. Перечислите все свойства заряда.
3. Сформулируйте свойство дискретности заряда.
4. Сформулируйте свойство аддитивности заряда.
5. Сформулируйте свойство инвариантности заряда.
6. Напишите закон Кулона для силы взаимодействия двух неподвижных зарядов.
7. Дайте определение электростатического (электрического) поля.
8. Дайте определение напряженности электрического поля.
9. Напишите формулу, определяющую напряженность электрического поля.
10. Напишите формулу, определяющую электрическую силу, действующую на точечный заряд в электрическом поле с заданной напряженностью.
11. Напишите формулу для напряженности электрического поля точечного заряда, расположенного в начале координат.
12. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрического поля.
13. Дайте определение потенциала электрического поля.
14. Напишите формулу для потенциала электрического поля точечного заряда, расположенного в начале координат.
15. Какое поле называется однородным?
16. Что такое конденсатор?
17. Напишите формулу емкости плоского конденсатора.
18. Какое поле существует между пластинами плоского конденсатора?
19. Какую форму имеет траектория движения электрона между пластинами плоского конденсатора?

## **Лабораторная работа № 3.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ**

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 2, §§ 5–10 или [2], §§ 77–80). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие электрических зарядов». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### **Цель работы**

1. Знакомство с моделированием электрического поля от точечных источников.

2. Экспериментальное подтверждение закономерностей для электрического поля точечного заряда и электрического диполя (ЭД).

3. Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

### Краткая теория

Электрическим полем (ЭП) называется то, что существует в области пространства, в которой на электрически заряженную частицу действует сила, называемая электрической (кулоновской).

Источником ЭП являются электрически заряженные частицы.

Зарядом (электрическим) называется особая характеристика объекта, определяющая его способность создавать ЭП и взаимодействовать с ЭП. Часто «зарядом» называют заряженную частицу, а «точечным зарядом» – материальную точку, имеющую электрический заряд.

Основные свойства электрического заряда:

1) заряд инвариантен – его величина одинакова при измерении в любой инерциальной системе отсчета;

2) заряд сохраняется – суммарный заряд изолированной системы тел не изменяется;

3) заряд аддитивен – заряд системы тел равен сумме зарядов отдельных тел;

4) заряд дискретен – заряд любого тела по величине кратен минимальному заряду, который обозначается символом  $e$  и равен  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ;

5) существуют заряды двух разных «сортов» – положительные и отрицательные; одноименные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

Сила взаимодействия двух заряженных частиц определяется законом Кулона

$$\vec{F}_{12} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{12}, \quad (2.2.1)$$

где  $\vec{e}_{12}$  – единичный вектор, направленный от первого заряда  $q_1$  ко второму  $q_2$ ,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды (в вакууме  $\epsilon = 1$ ).

Напряженность электрического поля – характеристика силового действия ЭП на заряд. Напряженность ЭП, есть векторная величина, определяемая соотношением

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (2.2.2)$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на заряд  $q$ .

Линия ЭП – линия, в любой точке которой вектор напряженности ЭП направлен по касательной к ней.

ЭП подчиняется принципу суперпозиции: напряженность ЭП нескольких источников является суммой векторов напряженности поля, создаваемого независимо каждым источником

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i . \quad (2.2.3)$$

Потоком вектора напряженности ЭП называется интеграл по некоторой поверхности  $S$  от скалярного произведения напряженности ЭП на элемент поверхности

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S} , \quad (2.2.4)$$

где вектор  $d\vec{S}$  направлен по нормали к поверхности.

Согласно теореме Гаусса поток вектора напряженности ЭП через замкнутую поверхность  $S$  пропорционален суммарному заряду, расположенному внутри объема, ограниченного этой поверхностью

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_j q_j . \quad (2.2.5)$$

Линии напряженности электрического поля точечного заряда представляют собой прямые линии, идущие от заряда (положительного) или к заряду (отрицательному).

Потенциалом данной точки  $\vec{r}$  ЭП называется скалярная характеристика ЭП, численно равная работе сил поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в другую фиксированную точку  $\vec{r}_0$ , в которой потенциал принят за 0 (например в бесконечность)

$$\varphi(\vec{r}) = \int_{\vec{r}}^{\vec{r}_0} \vec{E} d\vec{r} . \quad (2.2.6)$$

Уравнение, выражающее напряженность через потенциал, имеет вид

$$\vec{E} = -grad(\varphi) , \quad (2.2.7)$$

где оператор градиента  $grad\varphi = \vec{i} \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial\varphi}{\partial z}$ .

Диполь – это два одинаковых по величине, но противоположных по знаку точечных заряда  $q$ , расположенных на расстоянии  $l$  ( $l$  – плечо диполя).

Дипольный (электрический) момент определяется по формуле  $|\vec{p}_e| = qL$  а направлен этот вектор от отрицательного к положительному заряду.

На линии, проходящей через центр диполя, перпендикулярно электрическому моменту, и на большом расстоянии  $r$  от его центра

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p}_e}{r^3}. \quad (2.2.8)$$

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Рассмотрите внимательно рисунок и зарисуйте необходимое в конспект.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

#### *Эксперимент 1. Исследование поля точечного заряда*

Закройте окно теории, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите эксперимент «Взаимодействие электрических зарядов».

Зацепив мышью, перемещайте заряд  $q_1$  и зафиксируйте его вблизи левой границы экспериментального поля. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора величины первого заряда и установите его значение в соответствии с данными табл. 3.2.1 для вашего варианта. Заряд  $q_3$  поместите под первым, а его величину установите равной 0. Заряд  $q_2$  установите равным  $10^{-8} \text{ Кл}$ .

Таблица 3.2.1

**Значения величины заряда  $\frac{q_1}{10^{-8}} \text{ (Кл)}$**

Номер варианта				
1 и 5	4	6	8	10
2 и 6	4	5	9	10
3 и 7	-4	-5	-7	-9
4 и 8	-4	-6	-8	-10

Перемещайте, нажав левую кнопку мыши, заряд  $q_2$  вправо, устанавливая расстояния  $r_{12}$  до первого заряда, указанные в табл. 3.2.2. Из-

меренные в данных точках значения  $E_1 = \frac{F_{12}}{q_2}$  занесите в соответствующую строку табл. 3.2.2. Повторите измерения для трех других значений заряда  $q_1$  из табл. 3.2.1, записывая в табл. 3.2.2 значения  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ .

Таблицы 3.2.2, 3.2.3

**Результаты измерений (число измерений равно 9)**

$r$ (см)	20	30	...	100
$\frac{1}{r^2}$ ( $M^{-2}$ )				
$E_1$ ( $\frac{B}{M}$ )				
$E_2$ ( $\frac{B}{M}$ )				
$E_3$ ( $\frac{B}{M}$ )				
$E_4$ ( $\frac{B}{M}$ )				

**Эксперимент 2. Исследование поля диполя**

Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора величины второго заряда диполя ( $q_3$ ) и зафиксируйте значение заряда, указанное в табл. 3.2.1 для вашего варианта, изменив знак на противоположный. Переместите заряд  $q_3$  так, чтобы электрический момент диполя был вертикальным, а плечо диполя ( $l = r_{13}$ ) было равно 10 см.

Перемещайте мышью заряд  $q_2$  по линии, перпендикулярной оси диполя (горизонтально), удерживая левую кнопку мыши. На расстояниях  $r$  от оси диполя, указанных в табл. 3.2.2, измерьте и занесите значения  $E_1 = \frac{F_{12}}{q_2} \cdot \frac{l}{r_{12}}$  в табл. 3.2.3, аналогичную табл. 3.2.2 (кроме второй

строки, в которой надо записать  $\frac{1}{r^3}$  ( $M^{-3}$ )). Повторите измерения для

трех других значений зарядов  $q_1$  (и  $q_3$ ) из табл. 3.2.1, записывая в табл. 3.2.3 значения  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ .

### Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в таблицы 3.2.2 и 3.2.3 значения для второй строки.

2. Постройте на одном листе графики зависимости напряженности ЭП точечного заряда от квадрата обратного расстояния  $E = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$ .

3. Постройте на втором листе графики зависимости напряженности ЭП на оси диполя от куба обратного расстояния  $E = f\left(\frac{1}{r^3}\right)$ .

4. По тангенсу угла наклона графиков на каждом из двух листов определите электрическую постоянную, используя формулы:

$$\varepsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{r^2}\right)}{\Delta(E)} \quad (2.2.9)$$

для первого чертежа и

$$\varepsilon_0 = \frac{p}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{r^3}\right)}{\Delta(E)} \quad (2.2.10)$$

для второго (для больших расстояний  $r$ ).

5. Вычислите среднее значение электрической постоянной.

6. Запишите ответы и проанализируйте ответ и график.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрическое поле (ЭП)?
2. Назовите источники ЭП.
3. Перечислите и разъясните основные свойства заряда.
4. Какая сила действует между зарядами?
5. Дайте определение линии напряженности ЭП.
6. Запишите закон Кулона.
7. Запишите формулу для напряженности поля точечного заряда.
8. Сформулируйте принцип суперпозиции для ЭП.
9. Дайте определение потока ЭП.
10. Сформулируйте и запишите закон Гаусса для ЭП.
11. Что такое электрический диполь?
12. Запишите и разъясните формулу дипольного (электрического) момента.

13. Сформулируйте и запишите формулу для ЭП на оси диполя.
14. Какую форму имеет линия поля, проходящая через центр диполя?
15. Что такое потенциал ЭП и для чего он используется?
16. Что такое градиент?

### **Лабораторная работа № 3.3** **ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 2, §§ 34–36 или [2], §§ 96–101). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

#### **Цель работы**

1. Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
2. Экспериментальное подтверждение законов Ома и Кирхгофа.

#### **Краткая теория**

Согласно определению сила тока

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (3.3.1)$$

Закон Ома для участка цепи: сила тока, текущего по однородному (в смысле отсутствия сторонних сил) металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения  $U$  на проводнике

$$I = \frac{1}{R}U, \quad (3.3.2)$$

где  $R$  – сопротивление проводника.

Резистором называется устройство, обладающее заданным постоянным сопротивлением.

Напряжение на резисторе определяется по формуле

$$U_R = IR. \quad (3.3.3)$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (при наличии на участке сторонних сил):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}}{R}, \quad (3.3.4)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы концов участка  $E_{12}$  – электродвижущая сила (ЭДС), действующая на данном участке цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{E}{R}, \quad (3.3.5)$$

где  $E$  – суммарная ЭДС, действующая в цепи,  $R$  – суммарное сопротивление всей цепи.

Разветвленной цепью называется электрическая цепь, имеющая узлы.

Узлом называется точка, в которой сходится более чем два проводника. Ток, текущий к узлу, принято считать положительным, а ток, текущий от узла, считается отрицательным.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum I_k = 0. \quad (3.3.6)$$

Второе правило Кирхгофа: в каждом из замкнутых контуров, которые можно мысленно выделить в данной разветвленной цепи, алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum I_k R_k = \sum E_k. \quad (3.3.7)$$

При анализе разветвленной цепи следует обозначать с одним индексом ток, протекающий по всем последовательно соединенным элементам от одного узла до другого. Направление каждого тока выбирается произвольно. Ток, входящий в узел, учитывается с одним знаком, а выходящий из узла – с противоположным.

При составлении уравнений второго правила Кирхгофа токам и ЭДС нужно приписывать знаки в соответствии с выбранным (как вам удобно) направлением обхода:

а) ток принято считать положительным, если он совпадает с направлением обхода, и отрицательным, если он направлен против этого направления;

б) ЭДС считается положительной, если ее действие (создаваемый ею ток) совпадает с направлением обхода и отрицательной в противном случае.

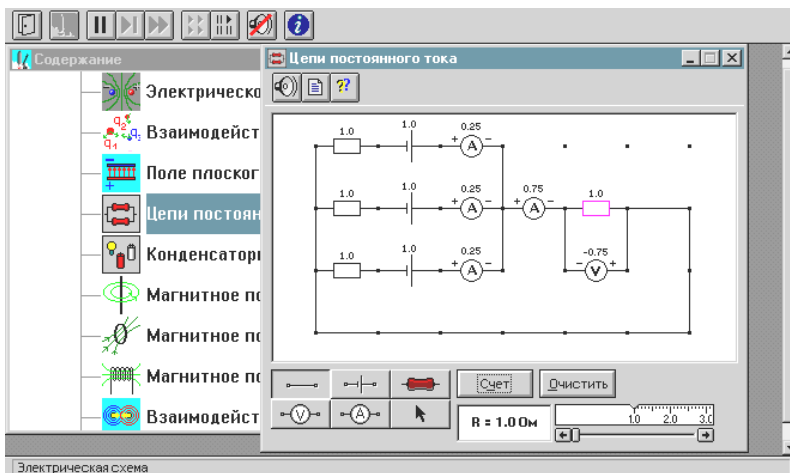
Количество уравнений первого правила Кирхгофа должно быть на одно меньше количества узлов в данной цепи. Количество независимых уравнений второго правила Кирхгофа должно быть таким, чтобы общее количество уравнений оказалось равным количеству различных токов. Каждый новый контур при этом должен содержать хотя бы один участок цепи, не вошедший в уже рассмотренные контуры.

### **Методика и порядок измерений**

В данной лабораторной работе исследуется модель простейшей разветвленной электрической цепи, состоящей из трех источников ЭДС, подключенных параллельно к одному резистору (нагрузке).



Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.



Нарисуйте в конспекте эквивалентную схему цепи, расположив источники один под другим и учитывая наличие внутреннего сопротивления у каждого источника. Укажите знаки ЭДС, направления токов в каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура. Составьте систему уравнений для нахождения токов в каждом участке.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Соберите на экране заданную эквивалентную цепь. Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой ЭДС в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Ориентируйтесь на рисунок схемы в описании к данной лабораторной работе. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен первый источник ЭДС. Переместите маркер мыши вниз на одну клетку и снова щелкните левой кнопкой под тем местом, где расположился первый источник. Там появится второй источник ЭДС. Аналогично разместите и третий источник.

2. Разместите далее последовательно с каждым источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку  $R$  в нижней части экрана) и амперметр (кнопка  $A$  там же). Затем расположите резистор нагрузки и последовательно соединенный с ним амперметр. Под нагрузкой расположите вольтметр, измеряющий напряжение на нагрузке.

3. Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкните левой кнопкой мыши в точке, где проходит провод.

4. Установите значения параметров для каждого элемента. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Затем щелкните на данном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра и установите числовое значение, равное взятому из табл. 3.3.1 для вашего варианта.

5. Установите сопротивления резистора нагрузки  $R=1 \text{ Ом}$ . Измерьте значения всех токов и напряжение на нагрузке (щелкнув мышью по кнопке «Счет») и запишите их в табл. 3.3.2. Меняя сопротивление  $R$  в соответствии с первым столбцом табл. 3.3.2, повторите измерения параметров и заполните табл. 3.3.2.

Таблица 3.3.1

**Значения ЭДС и внутреннего сопротивления источников**

Номер варианта	$E_1, E_2, E_3 \text{ (В)}$	$R_1, R_2, R_3 \text{ (Ом)}$
1	3, 7, -2	2, 1, 1
2	4, -3, -8	1, 3, 1
3	3, 6, -4	2, 1, 2
4	6, -2, -8	1, 1, 2
5	-6, 5, 8	2, 1, 1
6	5, 8, -4	1, 2, 1
7	-4, 6, -7	1, 1, 2
8	8, -4, 6	1, 3, 1

Таблицы 3.3.2, 3.3.3

**Результаты измерений**

$R \text{ (Ом)}$	$I_1 \text{ (А)}$	$I_2 \text{ (А)}$	$I_3 \text{ (А)}$	$I \text{ (А)}$	$U \text{ (В)}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Запишите для вашей цепи решение системы уравнений для всех токов в общем виде.
2. Рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите в табл. 3.3.3, идентичную табл. 3.3.2.
3. Постройте график экспериментальной зависимости падения напряжения на нагрузке от силы тока через нее  $U = f(I)$ .
4. Сформулируйте выводы по графику.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрический ток?
2. Дайте определение силы тока.
3. Дайте определение разности потенциалов (напряжения).
4. Напишите формулу, связывающую приращение потенциалов и напряжение.
5. Что такое резистор?
6. Напишите соотношения для расчета участка цепи с последовательно соединенными резисторами.
7. Напишите соотношения для расчета участка цепи с параллельно соединенными резисторами.
8. Напишите закон Ома для однородного участка цепи.
9. Какой участок цепи называется неоднородным?
10. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи.
11. Какими характеристиками описывается источник ЭДС?
12. Сформулируйте первое правило Кирхгофа. Какое свойство заряда оно отражает?
13. Запишите формулу для первого правила Кирхгофа и сформулируйте правило знаков.
14. Сформулируйте второе правило Кирхгофа.
15. Запишите формулу для второго правила Кирхгофа и сформулируйте правило знаков.
16. Сколько уравнений необходимо составлять по первому и второму правилу Кирхгофа для расчета электрической цепи?

## Лабораторная работа № 3.4 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т.2, §§ 39–47 или [2], §§ 109–114, 118–121). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Магнитное поле прямого тока».

Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое за-

пишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа вверху этого окна, и вызовите сначала эксперимент «Магнитное поле витка с током», а затем «Магнитное поле соленоида». Прочитайте и запишите в свой конспект необходимые краткие теоретические сведения.

### Цель работы

1. Знакомство с моделированием магнитного поля от различных источников.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля прямого провода и кругового витка (контра) с током.
3. Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

### Краткая теория

Магнитным полем (МП) называется то, что существует в области пространства, в которой на электрически нейтральный проводник с током действует сила, называемая магнитной. Источником МП является движущаяся электрически заряженная частица (заряд), которая создает также и электрическое поле.

Если вблизи одной движущейся заряженной частицы будет находиться вторая движущаяся с такой же скоростью заряженная частица, то на второй заряд будут действовать 2 силы: электрическая (кулоновская)  $\vec{F}_{эл}$  и магнитная сила  $\vec{F}_M$ , которая будет меньше электрической в  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$  раз, где  $v$  – скорость частиц,  $c$  – скорость света.

Магнитная индукция – характеристика силового действия МП на проводник с током, векторная величина, обозначаемая символом  $\vec{B}$ .

Линии магнитной индукции – линии, в любой точке которых вектор индукции МП направлен по касательной.

Анализ взаимодействия движущихся зарядов с учетом эффектов теории относительности (релятивизма) дает выражение для индукции  $d\vec{B}$  МП, создаваемого элементарным отрезком  $d\vec{L}$  с током  $I$ , расположенным в начале координат (закон Био-Савара-Лапласа или Б-С-Л):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \left[ d\vec{L} \times \vec{e}_r \right], \quad (3.4.1)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $\vec{e}_r$  – единичный радиус-вектор, направленный в точку наблюдения,  $\mu_0$  – магнитная постоянная, квадратными скобками обозначено векторное произведение. Направление вектора  $d\vec{B}$  может быть определено по правилу правого винта (бу-

равчика): направление вращения головки винта дает направление вектора  $d\vec{B}$ , если поступательное движение винта соответствует направлению тока в проводнике.

МП подчиняется принципу суперпозиции: индукция МП нескольких источников является суммой индукций полей, создаваемых независимо каждым источником

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i . \quad (3.4.2)$$

Циркуляцией МП называется интеграл по замкнутому контуру от скалярного произведения индукции МП на элемент контура

$$\Gamma_B = \int_L \vec{B} d\vec{L} . \quad (3.4.3)$$

Закон циркуляции вектора магнитной индукции МП: циркуляция МП по замкнутому контуру  $L_0$  пропорциональна суммарному току, пронизывающему поверхность  $S(L_0)$ , ограниченную этим контуром

$$\oint_{L_0} \vec{B} d\vec{L} = \mu_0 \sum_j I_j . \quad (3.4.4)$$

Закон Б-С-Л и принцип суперпозиции МП позволяют получить многие другие закономерности, в частности, индукцию магнитного поля прямого бесконечно длинного проводника с током

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} . \quad (3.4.5)$$

Линии магнитной индукции поля прямого проводника с током представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику, с центрами, расположенными на его оси.

Индукция МП на оси кругового контура (витка) радиуса  $R$  с током  $I$  на расстоянии  $r$  от центра

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{p}_m}{(R^2 + r^2)^{3/2}} , \quad (3.4.6)$$

где  $\vec{p}_m = IS\vec{e}_n$  – магнитный момент витка площадью  $S$ ,  $\vec{e}_n$  – единичный вектор положительной нормали к поверхности витка. Направление положительной нормали также определяется по правилу правого винта.

Соленоидом называется длинная прямая катушка с током. Величина индукции МП вблизи центра соленоида меняется очень мало. Такое поле можно считать практически однородным.

Из закона циркуляции МП можно получить формулу для индукции МП в центре соленоида

$$B = \mu_0 In , \quad (3.4.7)$$

где  $n$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида. Магнитная индукция внутри соленоида направлена вдоль его оси.

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Рассмотрите внимательно рисунок, изображающий компьютерную модель. Найдите на нем все основные регуляторы и поле эксперимента. Зарисуйте необходимое в конспект.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

#### Измерения

##### Эксперимент 1

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, эксперимент «Магнитное поле прямого тока». Наблюдайте линии индукции МП прямого провода.

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока, указанную в табл. 3.4.1 для вашего варианта.

3. Перемещая мышью «руку» вблизи провода, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях  $r$  до оси провода, указанных в табл. 3.4.2. Значения  $r$  и  $B$  занесите в табл. 3.4.2. Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 3.4.1.

Таблица 3.4.1

#### Значения силы тока

Номер варианта	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)
1 и 5	5	10	15	20
2 и 6	-5	-10	-15	-20
3 и 7	-15	-10	5	10
4 и 8	-20	-15	-10	5

##### Эксперимент 2

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, следующий эксперимент «Магнитное поле кругового витка с током». Наблюдайте линии индукции МП кругового витка (контура).

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока, указанную в табл. 3.4.1 для вашего варианта.

3. Перемещая мышью «руку» по оси витка, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях  $r$  до оси витка, указанных в табл. 3.4.2. Значения  $r$  и  $B$  занесите в табл. 3.4.3, аналогичную табл. 3.4.2 (кроме второй строки, в которой здесь надо записать  $\frac{1}{(R^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$  ( $M^{-3}$ )). Повторите

измерения для трех других значений тока из табл. 3.4.1.

Таблицы 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4

**Результаты измерений (число измерений равно 9)**

$r$ (см)	2	3	...	10
$\frac{1}{r}$ ( $M^{-1}$ )				
$B_1$ (Тл)				
$B_2$ (Тл)				
$B_3$ (Тл)				
$B_4$ (Тл)				

**Эксперимент 3**

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, следующий эксперимент «Магнитное поле соленоида». Наблюдайте линии индукции МП соленоида.

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока, указанную в табл. 3.4.1 для вашей бригады.

3. Перемещая мышью «руку» по оси соленоида, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях  $r$  до оси соленоида, указанных в табл. 3.4.2. Значения  $r$  и  $B$  занесите в табл. 3.4.4, аналогичную табл. 3.4.2 (кроме второй строки, в которой здесь не надо записывать ничего). Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 3.4.1.

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Вычислите и запишите в табл. 3.4.2, 3.4.3 и 3.4.4 значения для второй строки.

2. Постройте на одном листе графики зависимости индукции МП прямого провода с током от обратного расстояния  $B = f\left(\frac{1}{r}\right)$ .

3. Постройте на втором листе графики зависимости индукции МП

на оси витка с током от куба обратного расстояния  $B = f \left[ \frac{1}{(R^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$ .

4. На третьем листе постройте графики зависимости индукции МП на оси соленоида от расстояния до его центра.

5. По тангенсу угла наклона графиков на первых двух листах определите значение магнитной постоянной по формулам:

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (3.4.8)$$

для первого чертежа и

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{IS} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)} \quad (3.4.9)$$

для второго (площадь витка  $S = \pi R^2$ ).

6. Вычислите среднее значение магнитной постоянной.

7. Для магнитного поля соленоида при каждом токе определите протяженность  $\Delta r$  области однородности, в которой индукция меняется не более, чем на 10% от максимальной. Вычислите среднее значение области однородности.

8. Запишите ответы и проанализируйте ответ и график.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое магнитное поле (МП)?
2. Назовите источники МП.
3. Какие силы действуют между движущимися зарядами?
4. Во сколько раз магнитная сила меньше электрической для двух движущихся точечных электрических зарядов?
5. Какие силы и почему действуют между проводами с током?
6. Дайте определение линии индукции МП.
7. Запишите закон Био-Савара-Лапласа. В чем он похож на закон Кулона?
8. Сформулируйте принцип суперпозиции для МП.
9. Дайте определение циркуляции вектора магнитной индукции МП.
10. Сформулируйте и запишите теорему о циркуляции вектора магнитной индукции МП.
11. Сформулируйте и запишите формулу для магнитной индукции МП прямого провода с током.
12. Как выглядят линии индукции МП прямого провода с током?



13. Сформулируйте и запишите формулу для магнитной индукции МП на оси кругового витка (контур) с током.

14. Что такое магнитный момент витка с током?

15. Какую форму имеет линия индукции, проходящая через центр витка с током?

16. Что такое соленоид и для чего он используется?

17. Чему равно магнитное поле в центре соленоида?

18. Является ли МП внутри соленоида точно однородным?

## **Лабораторная работа № 3.5** **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 2, §§ 39–47 или [2], §§ 122–126). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Электромагнитная индукция».

Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа сверху этого окна.

### **Цель работы**

1. Знакомство с моделированием явления электромагнитной индукции (ЭМИ).
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей ЭМИ.

### **Краткая теория**

Элементарным магнитным потоком  $d\Phi_B$  через физически малый элемент поверхности площадью  $dS$  называется скалярное произведение вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$  на вектор нормали  $\vec{n}$  к данному элементу поверхности и на площадь  $dS$

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{n} dS . \quad (3.5.1)$$

Магнитным потоком  $\Phi_B$  через поверхность площадью  $S$  называется сумма всех элементарных потоков через все элементы этой поверхности (интеграл по поверхности)

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} . \quad (3.5.2)$$

Анализируя свойства интеграла в правой части данного соотношения, можем получить условия, когда для определения потока не требуется интегрирование.

Индукцией называется явление возникновения одного поля (например электрического) при изменении другого поля (например магнитного).

Электромагнитной индукцией (ЭМИ) называется явление возникновения электрического поля при изменении магнитного поля.

Закон (ЭМИ): циркуляция электрического поля по замкнутому контуру пропорциональна скорости изменения потока вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность  $S(L)$ , ограниченную контуром  $L$ , по которому рассчитана циркуляция

$$\oint_L \vec{E} d\vec{L} = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \oint_{S(L)} \vec{B} d\vec{S} \right). \quad (3.5.3)$$

В результате ЭМИ возникает электрическое поле с ненулевой циркуляцией. Поле с ненулевой циркуляцией называется вихревым.

Если в таком поле находится проводящее вещество, то в веществе возникает вихревой электрический ток, величина которого пропорциональна напряженности вихревого электрического поля. Такие токи называются токами Фуко.

Если проводящее вещество имеет форму замкнутого контура, тогда циркуляция электрического поля в нем определяет ЭДС, которая в случае ЭМИ называется ЭДС индукции. Закон ЭМИ для проводящего контура будет выглядеть так

$$E = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}. \quad (3.5.4)$$

Ток, который в этом случае появляется в контуре, называется индукционным.

Значение силы индукционного тока можно получить при помощи закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{E}{R}, \quad (3.5.5)$$

где  $R$  – сопротивление контура.

Если имеется замкнутый контур с переменным током, тогда магнитное поле с изменяющимся потоком создается собственным током в этом контуре, и в соответствии с законом ЭМИ в контуре возникает дополнительная ЭДС, называемая ЭДС самоиндукции.

Явлением самоиндукции называется возникновение ЭДС самоиндукции при протекании по проводнику переменного тока.

Закон самоиндукции имеет вид

$$E = -L \frac{dI}{dt}, \quad (3.5.6)$$

где  $L$  – индуктивность проводника.

## Методика и порядок измерений

Закройте окно теории.

В данной лабораторной работе используется компьютерная модель, в которой изменяющийся магнитный поток возникает в результате движения проводящей перемычки по параллельным проводникам, замкнутым с одной стороны.

Обозначим скорость перемычки  $v$ , ее сопротивление  $R$ , длина  $L$  индукция магнитного поля  $B$ . За время  $dt$  площадь контура изменится на  $dS = Lvdt$ , следовательно, по закону ЭМИ ЭДС индукции  $E = -\frac{d\Phi}{dt} = -B\frac{dS}{dt} = -BLv$ . Применяя закон Ома для полной цепи и опуская знак, окончательно получаем

$$I = \frac{E}{R} = \frac{BLv}{R}. \quad (3.5.7)$$

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Запустите эксперимент, щелкнув мышью по кнопке «Старт». Наблюдайте движение перемычки и изменение магнитного потока  $\Phi$  (цифры внизу окна).

2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов  $L$ ,  $R$  и  $B$  и зафиксируйте значения, указанные в табл. 3.5.1 для вашего варианта.

3. Установив указанное в табл. 3.5.2 значение скорости движения перемычки, нажмите левую кнопку мыши, когда ее маркер размещен над кнопкой «Старт». Значения ЭДС и тока индукции занесите в табл. 3.5.2. Повторите измерения для других значений скорости из табл. 3.5.2.

4. Повторите измерения для двух других значений индукции магнитного поля, выбирая их из табл. 3.5.1. Полученные результаты запишите в табл. 3.5.3 и 3.5.4, аналогичные табл. 3.5.2.

Таблица 3.5.1

### Значения характеристик

Номер варианта	$R$ (Ом)	$B_1$ (мТл)	$B_2$ (мТл)	$B_3$ (мТл)	$L$ (м)
1	1	-30	40	90	1
2	2	-40	20	80	1
3	1	-50	10	70	1
4	2	-60	-20	100	1
5	1	-30	40	90	0.7
6	2	-40	20	80	0.7
7	1	-50	10	70	0.7
8	2	-60	-20	100	0.7

**Результаты измерений (число измерений равно 11)**

$v \left( \frac{M}{c} \right)$	-10	-8	...	10
$E (B)$				
$I (mA)$				

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от скорости движения перемычки при трех значениях индукции магнитного поля.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta I}{\Delta v}. \quad (3.5.8)$$

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{BL}{R}. \quad (3.5.9)$$

4. Сравните полученные результаты и сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что называется элементарным магнитным потоком?
2. Что называется магнитным потоком?
3. При каких условиях магнитный поток равен нулю?
4. При каких условиях магнитный поток равен произведению индукции магнитного поля на площадь контура?
5. Сформулируйте определение явления электромагнитной индукции.
6. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
7. Дайте определение циркуляции вектора магнитной индукции.
8. Какое поле является вихревым?
9. Что такое ток Фуко?
10. Чем отличается электрическое поле, созданное точечным зарядом, от электрического поля, появляющегося при ЭМИ?
11. Сформулируйте закон ЭМИ для замкнутого проводящего контура.
12. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?

13. Сформулируйте определение явления самоиндукции.
14. Сформулируйте словами закон самоиндукции.
15. Назовите все способы создания переменного магнитного потока.
16. Как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
17. Как выглядит поверхность, через которую формируется переменный магнитный поток в данной работе?
18. Какова зависимость магнитного потока от времени в данной работе?
19. Как направлен вектор магнитной индукции в данной работе?

## **Лабораторная работа № 3.6** **СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике ([1], т.2, §§ 89, 90 или [2] §§ 140, 143, 146). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Свободные колебания в RLC контуре». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### **Цель работы**

1. Знакомство с компьютерной моделью процесса свободных затухающих колебаний в электрическом колебательном контуре.
2. Экспериментальное исследование закономерностей свободных затухающих колебаний.
3. Экспериментальное определение величины индуктивности контура.

### **Краткая теория**

Колебательным контуром называется замкнутая цепь, содержащая катушку индуктивности с индуктивностью  $L$  и конденсатор с емкостью  $C$ . Если в цепи нет активного сопротивления  $R$  (резистора), то в контуре возможны гармонические (незатухающие) колебания силы тока  $I$ , заряда конденсатора  $q$  и напряжения на элементах.

Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний имеет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0, \quad (3.6.1)$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – собственная частота колебаний.

Период колебаний определяется по формуле Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.6.2)$$

Решение уравнения свободных незатухающих колебаний можно записать в виде

$$q(t) = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (3.6.3)$$

где  $q_m$  – амплитуда,  $\omega_0 t + \alpha$  – фаза,  $\alpha$  – начальная фаза колебаний.

Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний записывается в виде

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (3.6.4)$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания.

Его решение

$$q(t) = q_{m0} \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \alpha), \quad (3.6.5)$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  – частота затухающих колебаний.

Постоянная времени затухания  $\tau$  в контуре есть время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в  $e \approx 2.73$  раз. На графике зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени касательная, проведенная к этому графику в начальный момент времени, пересекает ось времени в точке  $t = \tau$ .

Логарифмическим декрементом затухания называется величина, определяемая формулой

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T. \quad (3.6.6)$$

Добротность контура обратно пропорциональна логарифмическому декременту затухания  $Q = \frac{\pi}{\lambda}$ .

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Нажмите мышью кнопку «Выбор». Подведите маркер мыши к движку регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину емкости конденсатора, и установите числовое значение, равное взятому из табл. 3.6.1 для вашего вари-

анта. Аналогичным способом установите величину индуктивности в соответствии с табл. 3.6.1.

2. Установите сопротивления резистора  $R = 1 \text{ (Ом)}$ . Нажав кнопку «Старт», наблюдайте график зависимости заряда конденсатора от времени. Измерьте линейкой значения первых шести амплитуд и запишите их в табл. 3.6.2. Меняя сопротивление  $R$ , повторите измерения амплитуд и заполните остальные строчки табл. 3.6.2.

Таблица 3.6.1

**Значения емкости конденсатора и индуктивности катушки**

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$C \text{ (мкФ)}$	3	3	2.7	2.7	2.4	2.4	2	2
$L \text{ (мГн)}$	6	7	8	9	10	9	8	7

Таблица 3.6.2

**Результаты измерений**

$R \text{ (Ом)}$	$A_1 \text{ (мм)}$	$A_2 \text{ (мм)}$	$A_3 \text{ (мм)}$	$A_4 \text{ (мм)}$	$A_5 \text{ (мм)}$	$A_6 \text{ (мм)}$	$\tau \text{ (мс)}$	$\beta \text{ (с}^{-1}\text{)}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
$t \text{ (мс)}$								

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Рассчитайте значения периода колебаний.
2. Рассчитайте время  $t$ , при котором измерена соответствующая амплитуда и запишите в табл. 3.6.2.
3. Постройте на одном чертеже графики экспериментальных зависимостей амплитуды колебания  $A$  от времени  $t$  (6 линий, соответствующих разным  $R$ ).
4. Для каждого графика постройте касательную к нему в начальный момент времени. Продолжив касательную до пересечения с осью вре-

мени, определите экспериментальное значение постоянной времени затухания  $\tau$ , и запишите в табл. 3.6.2.

5. Рассчитайте величины коэффициента затухания по формуле  $\beta = \frac{1}{\tau}$  и также внесите в табл. 3.6.2.

6. Постройте график зависимости коэффициента затухания от сопротивления резистора.

7. По графику  $\beta(R)$  при помощи тангенса угла наклона определите индуктивность контура, используя формулу  $L = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{\Delta \beta}$ .

8. Запишите ответ и сформулируйте выводы по ответу и графикам.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое колебательный контур?
2. Дайте определение гармонических колебаний.
3. Что такое период колебания?
4. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электромагнитной индукции для проводящего контура.
5. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон самоиндукции.
6. Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные гармонические колебания.
7. Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные затухающие колебания.
8. Напишите формулу циклической частоты свободных гармонических колебаний в контуре.
9. Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных гармонических колебаниях в контуре.
10. Напишите формулу циклической частоты свободных затухающих колебаний в контуре.
11. Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных затухающих колебаниях в контуре.
12. Напишите формулу для коэффициента затухания.
13. Дайте определение постоянной времени затухания.
14. Напишите формулу логарифмического декремента затухания. Что он характеризует?
15. Напишите формулу связи логарифмического декремента затухания с коэффициентом затухания.
16. Напишите формулу для добротности контура. Что определяет добротность?



## Лабораторная работа № 3.7

### ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В RLC-КОНТУРЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 2, §§ 91–92 или [2], §§ 147–152). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Вынужденные колебания в RLC-контуре». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа сверху этого окна.

#### Цель работы

1. Знакомство с компьютерным моделированием процессов в колебательном RLC-контуре.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей при вынужденных колебаниях в RLC-контуре.

#### Краткая теория

Вынужденными колебаниями называются процессы, происходящие в контуре, содержащем конденсатор, катушку индуктивности, резистор и источник с переменной ЭДС, включенные последовательно и образующие замкнутую электрическую цепь.

Если ЭДС источника меняется по гармоническому закону, то в контуре наблюдаются вынужденные гармонические колебания. Все величины, характеризующие процессы, происходящие в цепи, будут изменяться по гармоническому закону.

Уравнение вынужденных колебаний в контуре можно записать в виде

$$q'' + 2\beta q' + \omega_0^2 q = \frac{u_m}{L} \cos \omega t, \quad (3.7.1)$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – собственная частота

незатухающих колебаний,  $u_m$  и  $\omega$  – амплитуда и частота внешнего источника напряжения. Решение этого неоднородного дифференциального уравнения представляет собой сумму общего решения однородного уравнения (формула 3.6.5 из лабораторной работы № 3.6) и частного решения неоднородного уравнения, которое имеет вид

$$q = q_m \cos(\omega t - \alpha), \quad (3.7.2)$$

где

$$q_m = \frac{u_m}{\omega \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}, \quad \alpha = \arctg \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} \quad (3.7.3)$$

амплитуда и начальная фаза колебаний заряда. Используя эти формулы и определение силы тока, можно записать выражение для силы тока в цепи в виде

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (3.7.4)$$

где амплитуда и начальная фаза силы тока определяются по формулам:

$$I_m = \frac{u_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (3.7.5)$$

При расчете цепей переменного тока можно использовать те же правила и формулы, которые применяются для цепей постоянного тока, только применять их необходимо для мгновенных значений любых характеристик. Проще всего расчет осуществляется при помощи метода векторных диаграмм, когда величины тока или напряжения изображаются векторами, вращающимися с угловой скоростью  $\omega$  вокруг начала координат. Если изобразить эти векторы для каждого участка цепи в один и тот же момент времени, то дальнейший расчет сводится к сложению векторов и применению теоремы косинусов или Пифагора. Для успешного применения метода векторных диаграмм необходимо знать выражения закона Ома для амплитудных значений и фазовые соотношения между током и напряжением на различных элементах цепи переменного тока. Ниже приводятся необходимые формулы для резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

1. На резисторе  $I_m = \frac{u_m}{R}$  сила тока совпадает с напряжением по фазе. Величина  $R$  называется активным сопротивлением.

2. На катушке индуктивности  $I_m = \frac{u_m}{\omega L}$  сила тока отстает по фазе от напряжения на  $\frac{\pi}{2}$ . Величина  $\omega L = X_L$  называется реактивным индуктивным сопротивлением.

3. На конденсаторе  $I_m = u_m \omega C$  сила тока опережает напряжение по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ . Величина  $\frac{1}{\omega C} = X_C$  называется реактивным емкостным сопротивлением.

Величина  $X = X_L - X_C$  называется реактивным сопротивлением цепи (реактансом).

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.7.6)$$

называется полным сопротивлением цепи (импедансом).

Резонансом для тока называется явление резкого увеличения амплитуды колебаний тока при приближении частоты ЭДС к некоторому значению, называемому резонансной частотой  $\omega_{PE3}$ . Значение резонансной частоты совпадает с частотой свободных колебаний, то есть

$$\omega_{PE3} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.7.7)$$

Максимум напряжения на конденсаторе соответствует резонансу для напряжения, который наблюдается при несколько меньшей частоте ЭДС

$$\omega_{PE3,U} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}. \quad (3.7.8)$$

Резонансной кривой называется зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты ЭДС.

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок для компьютерной модели и перерисуйте необходимое в конспект.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. При помощи регуляторов установите значения  $R$  и  $L_1$ , выбрав их из табл. 3.7.1 для вашего варианта.

2. Установите первое из указанных в табл. 3.7.2 значений емкости конденсатора. Изменяя величину частоты ЭДС, следите за перемещением отметки на резонансной кривой и числовым значением добротности

$$Q = \frac{u_{mC}}{u_m} \quad (\text{в модели добротность обозначена } Q = \frac{V_C}{V}). \text{ Добейтесь мак-}$$

симального значения добротности и соответствующие значения частоты источника ЭДС и собственной частоты контура занесите в табл. 3.7.2. Повторите измерения для других значений емкости конденсатора из табл. 3.7.2.

3. Повторите измерения для двух других значений индуктивности катушки, выбирая их из табл. 3.7.1. Полученные результаты запишите в табл. 3.7.3 и 3.7.4, аналогичные табл. 3.7.2.

Таблица 3.7.1

**Значения сопротивления и индуктивности контура**

Номер варианта	$R$ (Ом)	$L_1$ (мГн)	$L_2$ (мГн)	$L_3$ (мГн)
1	1	1	1.7	2.4
2	2	1.2	1.9	2.6
3	1	1.4	2.1	2.8
4	2	1.6	2.3	3
5	2	1	1.7	2.4
6	1	1.2	1.9	2.6
7	2	1.4	2.1	2.8
8	1	1.6	2.3	3

Таблицы 3.7.2, 3.7.3, 3.7.4

**Результаты измерений (число измерений равно 11)**

$C$ (мкФ)	50	55	...	100
$\omega_{PE3}$ (с <sup>-1</sup> )				
$\omega_0$ (с <sup>-1</sup> )				
$\frac{u_{mC}}{u_m}$				
$\frac{1}{\sqrt{C}}$ (Ф <sup>-1/2</sup> )				

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Постройте на одном листе графики зависимости резонансной частоты от корня из обратной емкости  $\omega_{PE3} = f\left(\frac{1}{\sqrt{C}}\right)$  при трех значениях индуктивности.

2. Для каждой прямой определите котангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{\Delta \left( \frac{1}{\sqrt{C}} \right)}{\Delta \omega_{\text{РЕЗ}}} \equiv A_{\text{ЭКСП}}. \quad (3.7.9)$$

3. Вычислите теоретическое значение константы  $A_{\text{ТЕОР}}$  для каждой прямой по формуле

$$A_{\text{ТЕОР}} = \sqrt{L}. \quad (3.7.10)$$

4. Сравните полученные результаты и сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вынужденным колебаниям.
2. Что такое колебательный контур?
3. Когда возникают вынужденные гармонические колебания?
4. Чему равны реактивные сопротивления катушки и конденсатора?
5. Чему равно реактивное сопротивление последовательно соединенных катушки и конденсатора?
6. Чему равно полное сопротивление колебательного контура?
7. Дайте определение резонанса для тока в колебательном контуре.
8. На какой частоте наблюдается резонанс для тока в колебательном контуре?
9. На какой частоте наблюдается резонанс для напряжения на конденсаторе в колебательном контуре?
10. Чему равно отношение амплитуд напряжения на конденсаторе при резонансе и ЭДС?
11. Что такое резонансная кривая контура?

## 4. ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

### Лабораторная работа № 4.1 ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике ([1], т. 2, §§ 119, 125–127, 129, 130 или [2], §§ 171, 172, 174, 176–178). Запустите программу. Выберите «Оптика» и «Интерференционный опыт Юнга». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

#### Цель работы

1. Знакомство с моделированием процесса сложения когерентных электромагнитных волн.
2. Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн от двух источников (щелей).

#### Краткая теория

Между дифракцией и интерференцией нет существенных физических различий. Оба явления заключаются в перераспределении в пространстве энергии светового потока, возникающем в результате суперпозиции волн.

Когерентностью называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

Когерентными называются волны одинаковой частоты, для которых разность фаз возбуждаемых ими колебаний остается постоянной во времени.

Интерференцией называется устойчивое перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным количеством дискретных когерентных источников волн.

Дифракцией называется устойчивое перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых расположенными непрерывно когерентными источниками волн. Одним из проявлений дифракции является распространение волны в область геометрической тени, т.е. туда, куда не попадают световые лучи.

Принцип Гюйгенса: каждый элемент волновой поверхности является источником вторичной сферической волны, а волна в любой точке перед этой поверхностью (с другой стороны от поверхности, нежели реальный источник волны) может быть найдена как результат суперпозиции волн, излучаемых указанными вторичными источниками.

Зонами Френеля называются такие участки на поверхности волнового фронта, для которых излучение от двух соседних участков при

сложении дает практически нулевой (минимальный) результат (излучение от двух соседних зон Френеля компенсируется). Расстояния от краев каждой зоны до точки наблюдения отличаются на  $\frac{\lambda}{2}$ .

Оптической разностью хода двух волн называется разность пройденных ими путей, умноженная на показатель преломления вещества, в котором они распространялись.

Две волны максимально усиливают друг друга при сложении, если их оптическая разность хода равна целому числу длин волн (условие максимумов).

Две волны максимально ослабляют друг друга при сложении, если их оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн (условие минимумов).

В опыте Юнга рассматриваются два точечных когерентных источника света, расстояние между которыми равно  $d$ . Источники удалены от экрана, на котором наблюдается интерференция на одинаковое расстояние  $L$ . Линейные координаты максимумов освещенности на экране, которые отсчитываются от точки пересечения срединного перпендикуляра к соединяющему источники отрезку с плоскостью экрана, могут быть найдены по формуле

$$x_m = \frac{mL\lambda}{d}, \quad (4.1.1)$$

где  $m$  – порядковый номер максимума.

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

Зарисуйте необходимое с экрана в свой конспект лабораторной работы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Подведите маркер мыши к движку регулятора вблизи картинки спектра, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, двигайте движок, установив числовое значение длины волны  $\lambda_1$ , взятое из табл. 4.1.1 для вашего варианта.

2. Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора расстояния между щелями, установите минимальное значение  $d = 1 \text{ мм}$ . Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние  $x_m$  между нулевым и первым максимумами и запишите в табл. 4.1.2. Увеличивая  $d$  каждый раз на  $0.3 \text{ мм}$ , измерьте еще 9 значений расстояния  $x_m$ .

3. Устанавливая новые числовые значения длины волны  $\lambda$ , из табл. 4.1.1 для вашего варианта, повторите измерения предыдущего пункта, записывая результаты в табл. 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5.

Таблица 4.1.1

**Значения длины волны**

Номер варианта	$\lambda_1$ (нм)	$\lambda_2$ (нм)	$\lambda_3$ (нм)	$\lambda_4$ (нм)
1	400	500	580	630
2	405	505	585	635
3	410	510	590	640
4	415	515	595	645
5	420	520	600	650
6	425	525	605	655
7	430	530	610	660
8	435	535	615	665

Таблицы 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5

**Результаты измерений при  $\lambda = \underline{\hspace{1cm}}$  нм (число измерений равно 10)**

$d$ (мм)	1	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7
$x_m$ (мм)										
$\frac{1}{d}$ (мм <sup>-1</sup> )										

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Рассчитайте и внесите в таблицы значения обратного расстояния между щелями.

2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей смещения первого максимума  $x_m$  от обратного расстояния

между щелями  $x_m = f\left(\frac{1}{d}\right)$  (указав на них длину волны  $\lambda$ ).



3. Для каждой линии при помощи тангенса угла наклона определите по графику экспериментальное значение произведения  $\lambda L$ , используя формулу

$$\lambda L = \frac{\Delta(x_m)}{\Delta(\frac{1}{d})}. \quad (4.1.2)$$

4. Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного произведения  $\lambda L$  и абсолютную ошибку измерений данного произведения.

5. Запишите ответ и проанализируйте ответы и графики.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое волна?
2. Что такое гармоническая волна?
3. Что такое длина волны?
4. Напишите математическое условие того, что функция  $f(x, t)$  описывает волну.
5. Что определяет форму волны и направление ее распространения?
6. Напишите математическую функцию, определяющую одномерную гармоническую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси ОХ.
7. Что такое когерентность?
8. Дайте определение когерентных волн.
9. Дайте определение явления интерференции.
10. Дайте определение явления дифракции.
11. Что такое волновая поверхность?
12. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
13. Дайте определение зон Френеля.
14. Что такое оптическая разность хода волн.
15. Сформулируйте условия максимумов и минимумов при интерференции.

## **Лабораторная работа № 4.2 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике ([1], т. 2, §§ 129, 130 или [2], §§ 180–182). Запустите программу. Выберите «Оптика» и «Дифракционная решетка». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### **Цель работы**

1. Знакомство с моделированием процесса сложения когерентных электромагнитных волн.

2. Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн с периодической структурой (дифракционной решеткой).

### Краткая теория

Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние, прямоугольных щелей в плоском непрозрачном экране.

Периодом (постоянной) дифракционной решетки называется расстояние  $d$  между серединами соседних щелей или сумма ширины щели  $b$  и ширины непрозрачного участка  $a$ .

При анализе излучения, проходящего через решетку, обычно используют линзу и экран, расположенный в фокальной плоскости линзы на расстоянии  $L$  от нее. Линза собирает параллельные лучи в одну точку на экране, положение которой зависит от угла падения  $\theta$  лучей на линзу.

Распределение интенсивности света на экране в зависимости от угла отклонения лучей (угла дифракции) имеет вид

$$I_{\text{РЕШ}} = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N \pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}, \quad (4.2.1)$$

где  $I_0$  – интенсивность, создаваемая одной щелью против центра линзы,  $N$  – число щелей решетки. Первый множитель обращается в 0 в точках, для которых  $b \sin \theta_k = \pm k \lambda$  ( $k = 1, 2, \dots$ ). Второй множитель принимает значение  $N^2$  в точках, удовлетворяющих условию  $d \sin \theta_m = \pm m \lambda$  ( $d \sin(\theta_m) = \pm m \lambda$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ )). Последнее условие определяет положение главных максимумов излучения, а  $m$  называется порядком максимума.

Отношение  $R_m$  интенсивности в  $m$ -том максимуме к интенсивности в нулевом максимуме называется «относительной интенсивностью  $m$ -того максимума».

Из формулы (4.2.1) можно получить выражение для относительной интенсивности максимумов

$$\sqrt{R_m} = 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{\pi b}{d} \right)^2 \left( \frac{1}{d} \right)^2. \quad (4.2.2)$$

### Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

При включении программы моделирования автоматически устанавливаются следующие параметры: порядок максимума  $m = 1$ , длина волны  $\lambda = 0.45 \text{ мкм}$ , расстояние между щелями  $d = 20 \text{ мкм}$ .

Нажимая левую кнопку мыши, установив ее маркер на дифракционной картине, меняйте  $m$  от 0 до 3 и наблюдайте изменение числового значения координаты максимума на экране. Установите длину волны излучения, соответствующую желтому цвету и, меняя  $m$  и  $d$ , снова наблюдайте картину интерференции.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Установите расстояние между щелями  $d = 20 \text{ мкм}$ .
2. Подведите маркер мыши к кнопке на спектре и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом состоянии, перемещайте кнопку до тех пор, пока над спектром не появится значение длины волны, равное взятому из табл. 4.2.1 для вашего варианта.
3. Измерьте линейкой на экране монитора длины светящихся отрезков, соответствующих интенсивности соответствующих максимумов на дифракционной картине. Запишите значения интенсивности в табл. 4.2.2.
4. Увеличивая  $d$  на 1 мкм, повторите измерения предыдущего пункта.
5. Установив новое значение длины волны из табл. 4.2.1, повторите измерения, записывая результаты в табл. 4.2.3, аналогичную табл. 4.2.2.

Таблица 4.2.1

#### Примерные значения длины волны

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_1 \text{ (нм)}$	400	410	420	430	440	450	460	470
$\lambda_{12} \text{ (нм)}$	600	610	620	630	640	650	660	670

Таблицы 4.2.2, 4.2.3

#### Результаты измерений при $\lambda = \text{--- нм}$

$d \text{ (мкм)}$	20	21	22	23	24	25	26	28	30
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{1}{d^2} \text{ (м}^{-2}\text{)}$									
$I_0 \text{ (мм)}$									

## Окончание табл. 4.2.2, 4.2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_1$ (мм)									
$I_2$ (мм)									
$I_3$ (мм)									
$I_4$ (мм)									
$\sqrt{R_1}$									
$\sqrt{R_2}$									
$\sqrt{R_3}$									
$\sqrt{R_4}$									

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Вычислите и запишите в табл. 4.2.2 и 4.2.3 корни из относительных амплитуд максимумов. Постройте по табл. 4.2.2 на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей корня из относительной амплитуды от обратного периода решетки  $\sqrt{R} = f\left(\frac{1}{d}\right)$  для всех максимумов (указав на них номер максимума). На втором рисунке постройте результаты по табл. 4.2.3.

2. По тангенсу угла наклона каждого графика определите экспериментальное значение ширины щели, используя формулу

$$b = \frac{\sqrt{6}}{m\pi} \sqrt{\frac{\Delta(\sqrt{R_m})}{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}}. \quad (4.2.3)$$

3. Вычислите среднее значение ширины щели и сравните его с действительным значением, использованным в компьютерной модели, которое равно  $b = 5 \text{ мкм}$ ; проанализируйте ответы и графики.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определение световой волны.
2. Напишите формулу зависимости напряженности электрического поля от времени и координаты для одномерной гармонической световой волны, распространяющейся вдоль оси ОХ.

3. Какие волны называются когерентными?
4. Дайте определение дифракции.
5. Что такое дифракционная решетка?
6. Для каких целей используется дифракционная решетка?
7. Что такое постоянная дифракционной решетки?
8. Зачем между дифракционной решеткой и экраном ставится собирающая линза?
9. Напишите формулу, выражающую условие главных максимумов освещенности при дифракции на решетке.

### **Лабораторная работа № 4.3 ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ**

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником ([1], т. 3, § 9 или [2], §§ 202, 203). Запустите программу. Выберите «Квантовая физика» и «Фотоэффект». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

#### **Цель работы**

1. Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта.
3. Экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода фотокатода и постоянной Планка.

#### **Краткая теория**

Фотоны – это частицы (кванты), поток которых является одной из моделей электромагнитного излучения (ЭМИ).

Энергия фотона согласно гипотезе Планка вычисляется по формуле

$$E = h\nu, \quad (4.3.1)$$

где  $\nu$  – частота излучения,  $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка.

Энергия часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-вольтах», которые выражаются через единицы системы СИ по формуле  $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

Масса фотона связана с его энергией соотношением Эйнштейна

$$E = mc^2; \quad (4.3.2)$$

из формул (4.3.1), (4.3.2) следует выражение для массы фотона

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (4.3.3)$$

Импульс фотона

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{E_\phi}{c}, \quad (4.3.4)$$

где  $\lambda$  – длина волны ЭМИ.

Внешний фотоэффект представляет собой явление вылета электронов из вещества (металла, фотокатода) при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например светом. Вылетевшие электроны называются фотоэлектронами. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

Основной закон внешнего фотоэффекта был установлен Эйнштейном и представляет собой закон сохранения энергии для взаимодействия фотона и электрона

$$h\nu = A_{\text{ВЫЛ}} + E_K, \quad (4.3.5)$$

где  $A_{\text{ВЫЛ}}$  представляет собой работу по преодолению притяжения металла (работа выхода), а  $E_K$  есть кинетическая энергия фотоэлектрона.

Красная граница фотоэффекта есть минимальная частота (максимальная длина волны) ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия фотона равна работе выхода

$$\nu_{\text{MIN}} = \frac{A_{\text{ВЫЛ}}}{h}, \quad \lambda_{\text{MAX}} = \frac{hc}{A}. \quad (4.3.6)$$

Запирающим (задерживающим) напряжением называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода, откуда следует выражение:

$$U_3 = \frac{h\nu - A_{\text{ВЫЛ}}}{e}, \quad (4.3.7)$$

где  $e$  – заряд электрона.

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Защепите мышью движок реостата регулятора интенсивности (мощности) облучения фотокатода и установите его на максимум.

Аналогичным образом установите нулевое напряжение между анодом и фотокатодом и минимальную длину волны ЭМИ. Наблюдайте движение электронов в фотоэлементе, изменяя напряжение до запирающего фототока.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

## Измерения

1. Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно увеличивая длину волны облучения фотокатода. Добейтесь полного отсутствия фототока. Зафиксируйте самую большую длину волны (она будет равна  $\lambda_{MAX}$ ), при которой фототок еще присутствует. Запишите в тетрадь значение длины волны красной границы фотоэффекта ( $\lambda_{MAX}$ ).

2. Для более точного определения связи запирающего напряжения с длиной волны падающего излучения необходимо:

а) установить значение запирающего напряжения в соответствии с табл. 4.3.1;

б) перемещая мышью вертикальную метку на спектре, установить такое максимальное значение длины волны, при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что практически все электроны долетают до анода и после этого движутся обратно к катоду).

Значения  $\lambda$  и  $U_{ЗАП}$  занесите в табл. 4.3.2.

Таблица 4.3.1

### Значения запирающего напряжения

Номер варианта	$U_{31} (В)$	$U_{32} (В)$	$U_{33} (В)$	$U_{34} (В)$
1 и 5	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2 и 6	-0.2	-0.4	-0.6	-0.9
3 и 7	-0.3	-0.5	-0.7	-1
4 и 8	-0.4	-0.7	-0.8	-1.1

Таблица 4.3.2

### Результаты измерений

$i$	1	2	3	4
$U_{з} (В)$				
$\lambda_i (нм)$				
$\frac{1}{\lambda_i} (М^{-1})$				

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн.
2. Постройте график зависимости напряжения запирающего (U<sub>зЛП</sub>) от обратной длины волны (1/λ).
3. Определите постоянную Планка, используя тангенс угла наклона графика и формулу

$$h = \frac{e \Delta(U_z)}{c \Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right)}. \quad (4.3.8)$$

4. Используя длину волны красной границы фотоэффекта, вычислите значение работы выхода материала фотокатода.
5. Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое фотоны?
2. Напишите формулу энергии фотона.
3. Напишите формулу, связывающую энергию фотона и его массу.
4. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
5. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
6. Что такое работа выхода?
7. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
8. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
9. Как устроен фотоэлемент?
10. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода.

## Лабораторная работа № 4.4 СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 3, §§ 12, 28 или [2], §§ 208–212). Запустите программу. Выберите «Квантовая физика», «Постулаты Бора». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### Цель работы

1. Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.
3. Экспериментальное определение постоянной Ридберга.



## Краткая теория

Спектром электромагнитного излучения (ЭМИ) называется совокупность электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых атомами (молекулами) данного вещества.

Линейчатый спектр состоит из отдельных компонент (линий), близких к гармоническим. Расстояние между линиями (по шкале длин волн или частот) много больше ширины линий. Такой спектр излучают атомарные газы.

Кроме линейчатого выделяют еще полосатый спектр, который излучают молекулярные газы и сплошной спектр, излучаемый нагретыми твердыми телами.

Планетарная модель атома: в центре атома расположено очень малое положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным (разрешенным) стационарным орбитам движутся электроны, масса которых во много раз меньше массы ядра. При движении по орбите электрон не испускает электромагнитного излучения (ЭМИ). При поглощении ЭМИ (фотона) электрон переходит на более «высокую» разрешенную орбиту, на которой его энергия становится больше на величину  $\Delta E$ , равную энергии поглощенного фотона  $E = h\nu$ . При обратном переходе электрон испускает фотон с такой же энергии.

Квантовая модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней электрон не имеет точно определенной координаты и скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить (и нарисовать) только границы области его преимущественного движения (орбитали).

Уравнение Шредингера для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода используется для анализа квантовой модели атома. В результате решения этого уравнения получается волновая функция, которая зависит не только от координаты  $\vec{r}$  и времени  $t$ , но и от 4-х параметров, имеющих дискретный набор значений и называемых квантовыми числами. Они имеют названия: главное, азимутальное, магнитное и магнитное спиновое.

Главное квантовое число  $n$  может принимать целочисленные значения 1, 2,.... Оно определяет величину энергии электрона в атоме

$$E_n = -\frac{E_i}{n^2}, \quad (4.4.1)$$

где  $E_i$  – энергия ионизации атома водорода (13.6 эВ).

Азимутальное (орбитальное) квантовое число  $l$  определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении

$$|\vec{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}. \quad (4.4.2)$$

Оно принимает целочисленные значения  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ .

Магнитное квантовое число  $m_l$  определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона  $L_z$  на направление внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ . Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, по модулю меньшие или равные  $l$ :

$$L_z = \hbar m_l, \quad (4.4.3)$$

где  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ .

Магнитное спиновое квантовое число  $m_s$  определяет проекцию вектора собственного момента импульса электрона (спина  $\vec{S}$ ) на направление внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ :

$$S_z = \hbar m_s \quad (4.4.4)$$

и принимает только 2 значения:  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ .

Для модуля спина

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s(s+1)}, \quad (4.4.5)$$

где  $s$  – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только одно значение. Например для электрона  $s = \frac{1}{2}$  (аналогично для протона и нейтрона). Для фотона  $s = 1$ .

Вырожденными называются состояния электрона с одинаковой энергией.

Кратность вырождения равна количеству состояний с одной и той же энергией.

Краткая запись состояния электрона в атоме: цифра, равная главному квантовому числу, и буква, определяющая азимутальное квантовое число.

Электрон в атоме может совершать переходы только между состояниями, для которых разность значений азимутального квантового числа равна  $\pm 1$  (правило отбора).

Спектральной серией называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии. В атоме водорода выделяют следующие спектральные серии:

- а) серия Лаймана,  $np \rightarrow 1s$ ;
- б) серия Бальмера,  $ns \rightarrow 2p$ ,  $nd \rightarrow 2p$ ;
- в) серия Пашена,  $nf \rightarrow 3d$ ,  $np \rightarrow 3d$ ;
- г) серия Брэкета,  $ng \rightarrow 4f$ ,  $nd \rightarrow 4f$ .

## Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунки. Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### Измерения

1. Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана. Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером  $n_0$ , указанным в табл. 4.4.1 для вашего варианта, и нажмите левую кнопку мыши.

2. Наблюдайте и зарисуйте мигающие стрелки на модели атома водорода (в левом верхнем поле), а также стрелки в правом поле и отметки в нижнем поле, соответствующие линиям в данной серии.

3. Запишите в табл. 4.4.2 величину главного квантового числа  $n_0$  для нижнего уровня энергии данной серии, название серии и длины волн отдельных линий.

Таблица 4.4.1

### Значения главных квантовых чисел

Номер варианта	Главное квантовое число нижнего уровня $n_0$
1 и 5	1
2 и 6	2
3 и 7	3
4 и 8	4

Таблица 4.4.2

### Результаты измерений

Номер линии $i$	$n$	$\lambda_i$ (нм)	$\frac{1}{\lambda_i}$ ( $\text{м}^{-1}$ )
1			
2			
3			
4			

## Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в табл. 4.4.2 обратные длины волн.
2. Определите, переходу между какими квантовыми состояниями электрона в атоме водорода соответствует каждая линия излучения. Запишите в таблицу значения  $n$ .
3. Постройте график зависимости обратной длины волны от обратного квадрата главного квантового числа  $\frac{1}{\lambda} = f\left(\frac{1}{n^2}\right)$  для данной спектральной серии.
4. Определите по тангенсу угла наклона графика значение постоянной Ридберга по формуле

$$R = \frac{\Delta(1/\lambda)}{\Delta(1/n^2)}. \quad (4.4.6)$$

5. Сравните полученное значение с табличным ( $R = 1.1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ), запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?
2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ и что является его источником?
3. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
4. Что такое сплошной спектр ЭМИ и что является его источником?
5. Опишите планетарную модель атома.
6. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
7. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома? Что является решением этого уравнения?
8. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
9. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
10. Что определяет главное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
11. Что определяет азимутальное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
12. Что определяет магнитное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
13. Что такое спин электрона?
14. Что определяет спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.

15. Что определяет магнитное спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что такое вырожденные состояния?
17. Как определить кратность вырождения состояния?
18. Сформулируйте правило отбора.
19. Что такое спектральная серия?
20. Назовите основные спектральные серии излучения атомарного водорода.

## **Лабораторная работа № 4.5** **ЭФФЕКТ КОМПТОНА**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике ([1], т. 3, §§ 12, 28 или [1], § 206). Запустите программу. Выберите «Квантовая физика», «Комптоновское рассеяние». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

### **Цель работы**

1. Знакомство с моделями электромагнитного излучения и их использованием при анализе процесса рассеяния рентгеновского излучения на веществе.
2. Экспериментальное подтверждение закономерностей эффекта Комптона.
3. Экспериментальное определение комптоновской длины волны электрона.

### **Краткая теория**

Модели электромагнитного излучения (ЭМИ):

- а) луч – линия распространения ЭМИ (геометрическая оптика);
- б) волна – гармоническая волна, имеющая амплитуду и определенную длину волны или частоту (волновая оптика);
- в) поток частиц (фотонов) используется в квантовой оптике и для объяснения многих эффектов, на которых основана квантовая теория строения вещества.

Эффектом Комптона называется появление рассеянного излучения с большей длиной волны при облучении вещества монохроматическим рентгеновским излучением.

Рентгеновским называется электромагнитное излучение, которое можно моделировать с помощью электромагнитной волны с длиной от

$10^{-8}$  до  $10^{-12}$  м, или с помощью потока фотонов с энергией от 100 эВ до  $10^6$  эВ.

Рассмотрим процесс столкновения рентгеновского фотона (энергия  $\hbar\omega$ , импульс  $\hbar\vec{k}$ ) с покоящимся электроном вещества. Энергия электрона до столкновения равна его энергии покоя  $mc^2$ , где  $m$  – масса покоя электрона. Импульс электрона равен 0.

После столкновения электрон будет обладать импульсом  $\vec{p}$  и энергией, равной согласно соотношениям специальной теории относительности  $c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$ . Энергия фотона станет равной  $\hbar\omega'$ , а импульс  $\hbar\vec{k}'$ .

Применяя законы сохранения импульса и энергии, можно получить выражение для изменения длины волны рассеянного фотона в зависимости от угла рассеяния

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos\theta), \quad (4.5.1)$$

где комptonовская длина волны  $\lambda_C = \frac{h}{mc}$ . Для электрона  $\lambda_C = 2.43 \cdot 10^{-12}$  м.

### Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок. Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

#### Измерения

1. Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.
2. Подведите маркер мыши к движку регулятора длины волны падающего ЭМИ и установите первое значение длины волны из табл. 4.5.1, соответствующее номеру вашего варианта.
3. Подведите маркер мыши к движку регулятора угла приема рассеянного ЭМИ и установите первое значение из табл. 4.5.2.
4. По картине измеренных значений определите длину волны  $\lambda'$  рассеянного ЭМИ и запишите в первую строку табл. 4.5.2.
5. Изменяйте угол наблюдения с шагом  $10^0$  и записывайте измеренные значения  $\lambda'$  в соответствующие строки табл. 4.5.2.
6. Заполнив все строки табл. 4.5.2, измените значение длины волны падающего ЭМИ в соответствии со следующим значением для вашего варианта из табл. 4.5.1. Повторите измерения длины волны рассеянного ЭМИ, заполняя сначала табл. 4.5.3, а затем и табл. 4.5.4 (аналогичные табл. 4.5.2).

Таблица 4.5.1

**Длины волн ЭМИ**

Номер варианта	Длина волны $\lambda$ (нм)		
	1 и 5	3	5
2 и 6	3.5	5.5	8
3 и 7	4	6	9
4 и 8	4.5	6.5	10

Таблицы 4.5.2, 4.5.3, 4.5.4

**Результаты измерений и расчетов (число измерений равно 11)**

Номер измерения	$\theta$ (град)	$\lambda'$ (нм)	$1 - \cos \theta$
1	60		
2	70		
...	...		
11	160		

**Обработка результатов и оформление отчета**

1. Вычислите и запишите в табл. 4.5.2–4.5.4 величины  $1 - \cos \theta$ .
2. Постройте графики зависимости  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = f(1 - \cos \theta)$  от разности для каждой серии измерений.
3. Определите по тангенсу угла наклона графика значение комптоновской длины волны электрона по формуле

$$\lambda_c = \frac{\Delta(\Delta\lambda)}{\Delta(1 - \cos \theta)}. \quad (4.5.2)$$

4. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Назовите модели, с помощью которых описывается электромагнитное излучение.
2. Назовите области физики, в которых используются соответствующие модели ЭМИ.
3. Что такое луч?

4. Что такое гармоническая волна?
5. Назовите эффекты, для описания которых надо использовать и волновую и квантовую модели ЭМИ.
6. Как моделируется процесс взаимодействия падающего рентгеновского фотона и свободного электрона вещества?
7. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона с электроном в эффекте Комптона.
8. Сравните поведение фотонов после взаимодействия с электронами в эффекте Комптона и фотоэффекте.
9. Что такое комптоновская длина волны частицы?
10. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии фотонов на электронах, сильно связанных с ядром атома?
11. Как меняется энергия фотона при его комптоновском рассеянии?
12. Что происходит с электроном после рассеяния на нем фотона?
13. Чем отличается масса от массы покоя? Когда они совпадают?
14. Напишите формулу для импульса фотона.
15. Напишите формулу изменения длины волны для эффекта Комптона.
16. Чему равно максимальное изменение длины волны рассеянного фотона и когда оно наблюдается?



# СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука, 1979.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2001.

## СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

### Фундаментальные физические постоянные

Название	Обозначение	Величина	Размерность
Гравитационная постоянная	$G$ или $\gamma$	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\frac{\dot{I} \cdot \dot{i}^2}{\hat{e}\hat{a}^2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g$	9.81	$\frac{\dot{i}}{\hat{n}^2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$	$\frac{\dot{i}}{\hat{n}}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6.02 \cdot 10^{23}$	$\ddot{u}\ddot{u}\ddot{u}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	8.31	$\frac{\dot{A}\hat{e}}{\ddot{u}\ddot{u}\ddot{u} \cdot \hat{E}}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$\frac{\dot{A}\hat{e}}{\hat{E}}$
Элементарный заряд	$e$	$1.6 \cdot 10^{-19}$	$\hat{E}\ddot{e}$
Масса электрона	$m_e$	$9.11 \cdot 10^{-31}$	$\hat{e}\hat{a}$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0$	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$\frac{\hat{O}}{\dot{i}}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\frac{\dot{A}\dot{i}}{\dot{i}}$
Постоянная Планка	$h$	$6.63 \cdot 10^{-34}$	$\dot{A}\hat{e} \cdot \hat{n}$

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. МЕХАНИКА .....	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.1 ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ .....	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2 ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОЙ СИЛЫ .....	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.3 МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.....	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.4 УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ УДАРЫ .....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.5 СОУДАРЕНИЯ УПРУГИХ ШАРОВ.....	23
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА .....	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1 АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС .....	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА .....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3 ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ .....	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.4 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА .....	39
3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ .....	45
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.1 ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	45
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ .....	49
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.3 ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	55
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.4 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ .....	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.5 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ .....	65
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.6 СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ.....	69
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.7 ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В RLC-КОНТУРЕ.....	73

4. ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА .....	78
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.1 ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ .....	78
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.2 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА .....	81
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.3 ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ .....	85
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.4 СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА .....	88
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.5 ЭФФЕКТ КОМПТОНА .....	93
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	97
СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ .....	97

Учебное издание

Олейник Анжелика Ивановна  
Родкина Людмила Романовна  
Шавлюгин Александр Иванович  
Шмакова Елена Эдуардовна

## **ФИЗИКА**

Лабораторный практикум

Редактор Л.И. Александрова  
Компьютерная верстка С.Ю. Заворотной

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 03816 от 22.01.2001

Подписано в печать 31.03.2005. Формат 60×84/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,81.  
Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 200 экз. Заказ

---

Издательство Владивостокского государственного университета  
экономики и сервиса

690600, Владивосток, ул. Гоголя, 41  
Отпечатано в типографии ВГУЭС  
690600, Владивосток, ул. Державина, 57

