

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Севастопольский государственный университет»

ВИРТУАЛЬНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ П Р А К Т И К У М

Методические указания

к лабораторным работам по дисциплине «Физика»
для студентов технических направлений подготовки
и специальностей очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 53:004(076.5)
ББК 22.3:32.97я73
В 526

Р е ц е н з е н т:

М.П. Евстигнеев – доктор физико-математических наук, профессор

Составители: Д.П. Воронин, О.В. Рогова, В.В. Костюков, В.В. Баракин

В 526 Виртуальный физический практикум: метод. указания к лабораторным работам по дисциплине «Физика» для студентов технических направлений подготовки и специальностей очной и заочной форм обучения / Сост. Д.П. Воронин, О.В. Рогова, В.В. Костюков, В.В. Баракин. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 64 с.

Цель методических указаний: ознакомиться с методикой проведения виртуальных лабораторных работ по дисциплине «Физика», освоить способы моделирования физических явлений и процессов, проводить первичную обработку результатов наблюдений, расчетов и измерений физических величин. Пособие должно способствовать сознательному изучению теоретического материала курса физики в соответствии с действующей программой. Виртуальный практикум должен помочь студентам подготовиться к сдаче модулей и экзаменов по дисциплине «Физика».

Пособие включает краткий теоретический и справочный материал, перечень контрольных вопросов и задач по темам виртуальных работ.

Пособие адресовано студентам и преподавателям, а также всем кто желает ознакомиться с некоторыми примерами применения электронно-вычислительной техники для изучения и моделирования физических явлений и процессов.

УДК 53:004(076.5)
ББК 22.3:32.97я73

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Физика», протокол № 7 от 27 февраля 2018 г.

Рекомендовано методической комиссией Института радиоэлектроники и информационной безопасности Севастопольского государственного университета в качестве методических указаний.

Изд. № 1/18. Объем 4 п.л.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа 1 В. Изучение динамики движения тел с переменной массой	5
Лабораторная работа 2 В. Изучение законов реального газа	10
Лабораторная работа 3 В. Моделирование распределения Максвелла на ЭВМ	16
Лабораторная работа 4 В. Изучение законов движения заряда в магнитном поле	21
Лабораторная работа 5 В. Изучение интерференционного опыта Юнга	26
Лабораторная работа 6 В. Определение постоянной Планка	32
Лабораторная работа 7 В. Эффект Комптона	38
Лабораторная работа 8 В. Опыт Франка и Герца	43
Лабораторная работа 9 В. Элементы вакуумной техники. Знакомство С устройством и принципом работы форвакуумного и паромасляного (диффузионного) насоса	48
Рекомендации при записи результатов измерений и расчетов	58
Тест для проверки правильности записи результатов измерений	61
Приложение А. Физические постоянные	62
Приложение Б. Периодическая система химических элементов	63
Приложение В. Коэффициенты Стиюдента	64

ВВЕДЕНИЕ

Виртуальный физический практикум является руководством к лабораторным занятиям по дисциплине «Физика» для студентов очной и заочной форм обучения всех инженерных направлений подготовки и специальностей. Основной задачей данного практикума является освоение методики моделирования физических явлений и процессов с использованием современных цифровых технологий.

Практикум содержит описание лабораторных работ по дисциплине «Физика». Кроме того, лабораторные работы выполняются на базе учебного компьютерного курса «Открытая физика» под редакцией проф. С.М. Козела.

Пособие содержит описание девяти виртуальных лабораторных работ по всем частям курса общей физики. Кроме того, учитывая современные тенденции развития нанотехнологий, в пособие включена одна лабораторная работа по приборам для получения вакуума. В работе приводится описание устройства и принципа работы диффузионного паромасляного насоса.

В описании каждой лабораторной работы содержатся: цель виртуального эксперимента, рекомендуемая литература, краткое теоретическое обоснование используемых методик, список приборов и принадлежностей, порядок выполнения работы, получения и обработки экспериментальных данных, контрольные вопросы для самоподготовки студентов.

В процессе подготовки к лабораторным занятиям студент должен изучить теорию вопроса используя рекомендованную литературу, составить в рабочей тетради краткий конспект выполняемой работы с описанием теоретического обоснования, схемы лабораторной установки, методики обработки результатов экспериментальных исследований. Отдельно составляется отчет к лабораторной работе по установленной форме. В отчете к лабораторной работе студент должен представить для защиты заполненные таблицы экспериментальных данных, результаты вычислений и оценки погрешности измерений и расчетов. В заключении необходимо записать краткие выводы по работе.

Студент должен освоить современные методы оценки погрешностей измеряемых и рассчитываемых величин с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики, обращая при этом внимание на грамотность при записи окончательных расчетов.

Настоящее пособие подготовлено к изданию коллективом сотрудников кафедры «Физика» Севастопольского государственного университета. Оформление пособия и подготовка к печати осуществлено старшим преподавателем Ворониным Д.П.

Работа по совершенствованию виртуального физического практикума продолжается и мы надеемся получить от читателей советы и предложения по улучшению данного пособия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 В

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить динамику движения тел с переменной массой.
2. Определить запас топлива в ракете для достижения первой и второй космических скоростей.
3. Изучить некоторые кинематические характеристики движения ракет.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. - 350 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 ДВИЖЕНИЕ РАКЕТЫ С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ



Рис. 1. Схема ракеты

Рассмотрим движение ракеты, рис. 1.

Пусть к некоторому моменту времени t масса ракеты с топливом равна m , скорость её движения относительно Земли V , скорость вылета продуктов сгорания топлива относительно ракеты U . Тогда импульс ракеты в данный момент времени равен $\vec{P} = m\vec{V}$. К моменту времени $t + dt$ в процессе сгорания топлива массой dm скорость ракеты увеличилась и стала равной $V + dV$, а масса ракеты уменьшилась на dm и стала равной $m - dm$.

Импульс ракеты и топлива к данному моменту времени может быть определен по формулам $\vec{P}_1 = (m - dm)(\vec{V} + d\vec{V})$, $\vec{P}_2 = dm(\vec{V} + \vec{U})$. При этом абсолютная скорость движения топлива, т.е. скорость вылета продуктов сгорания топлива из ракеты относительно Земли $(\vec{V} + \vec{U})$.

Изменение импульса за промежуток времени dt равно

$$d\vec{P} = (m - dm)(\vec{V} + d\vec{V}) + dm(\vec{V} + \vec{U}) - m\vec{V} = m d\vec{V} + \vec{U} dm. \quad (1)$$

(величиной второго порядка малости $dmdV$ пренебрегаем).

По второму закону динамики действующая сила равна скорости изменения импульса

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = m \frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{U} \frac{dm}{dt}. \quad (3)$$

Для изолированной системы внешняя сила равна нулю, поэтому уравнение (3) будет иметь следующий вид:

$$m d\vec{V} + \vec{U} dm = 0. \quad (4)$$

Решим полученное дифференциальное уравнение методом разделения переменных.

$$d\vec{V} = -\vec{U} \frac{dm}{m}. \quad (5)$$

Проинтегрируем соотношение (5):

$$\int_0^V d\vec{V} = \int_{M_0}^M -\vec{U} \frac{dm}{m}, \quad (6)$$

где M_0 – начальная масса полностью снаряженной топливом ракеты (масса ракеты вместе с топливом); $M_0 = M_T + M_{\pi}$ (где M_{π} – полезная масса ракеты, масса ракеты без топлива).

M – текущая (в данный момент времени) масса ракеты с оставшейся массой топлива.

Учитывая, что dM – величина отрицательная, численное значение скорости движения ракеты определится после интегрирования (6).

$$V = U \ln \frac{M_0}{M}. \quad (7)$$

Полученное уравнение (6) называется уравнением Циолковского.

Масса топлива сгоревшего при движении ракеты может быть определена по формуле

$$M_T = M_0 - M. \quad (8)$$

Из данных компьютерного эксперимента, можно построить зависимость $M = m(t)$ (рис. 2).

Скорость расхода (сгорания) топлива $U_{\text{топ}}$:

$$U_{\text{топ}} = \frac{\Delta m}{\Delta t}. \quad (9)$$

Следовательно, по тангенсу угла наклона зависимости $M = m(t)$, (участок графика до t_C , где t_C – время сгорания топлива) можно определить скорость сгорания топлива.

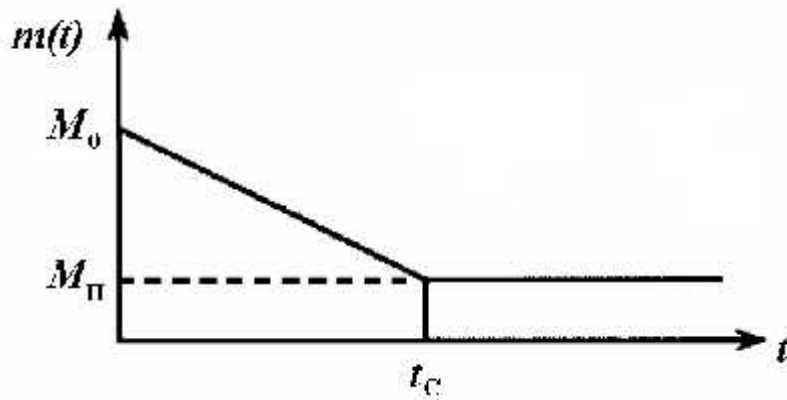


Рис. 2. Зависимость массы ракеты от времени

Если скорость движения ракеты относительно Земли достигнет значения примерно 7,9 км/с, то ракета будет двигаться по круговой орбите. Эта скорость называется первой космической. Если скорость ракеты будет равна или больше 11,2 км/с, то ракета может преодолеть гравитационное притяжение Земли и стать спутником Солнца (вторая космическая скорость). В том случае, когда скорость ракеты достигнет 16,7 км/с (третья космическая скорость), ракета, преодолевая притяжение Солнца, покинет Солнечную систему.

Путь S , который проходит ракета можно определить по формуле

$$S = \int_0^t V(t) dt. \quad (10)$$

3.2 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент позволяет изменять количество топлива, помещенного в ракету, определять максимальную скорость ракеты. Компьютерная программа предусматривает графический вывод на монитор зависимости скорости движения ракеты от времени $V = f(t)$, а также значение максимальной скорости ракеты. Кроме этого в пошаговом режиме на экран выводится информация о массе ракеты в данный момент времени.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1» ООО «Физикон».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите программу «Открытая физика 1.1» на компьютер.
2. Запустите установленную программу, в разделе – «Содержание», откройте вкладку «Механика», выберите компьютерную модель – «Реактивное движение», рисунок 3.
3. Включите непрерывный режим компьютерного эксперимента. Нажмите «Старт» и «Выбор». Установите начальную массу ($M_0 = 10$ т) ракеты вместе с топливом в соответствии с таблицей 1 для первого эксперимента.
4. Проведите первый эксперимент. Нажмите «Старт» и на экране монитора наблюдайте движение ракеты в пространстве. Проанализируйте построенный

график зависимости скорости движения ракеты от времени. Определите из графика максимальную скорость ракеты при полном сгорании топлива, когда ракета движется равномерно, без ускорения. Результаты измерения запишите в табл. 1.

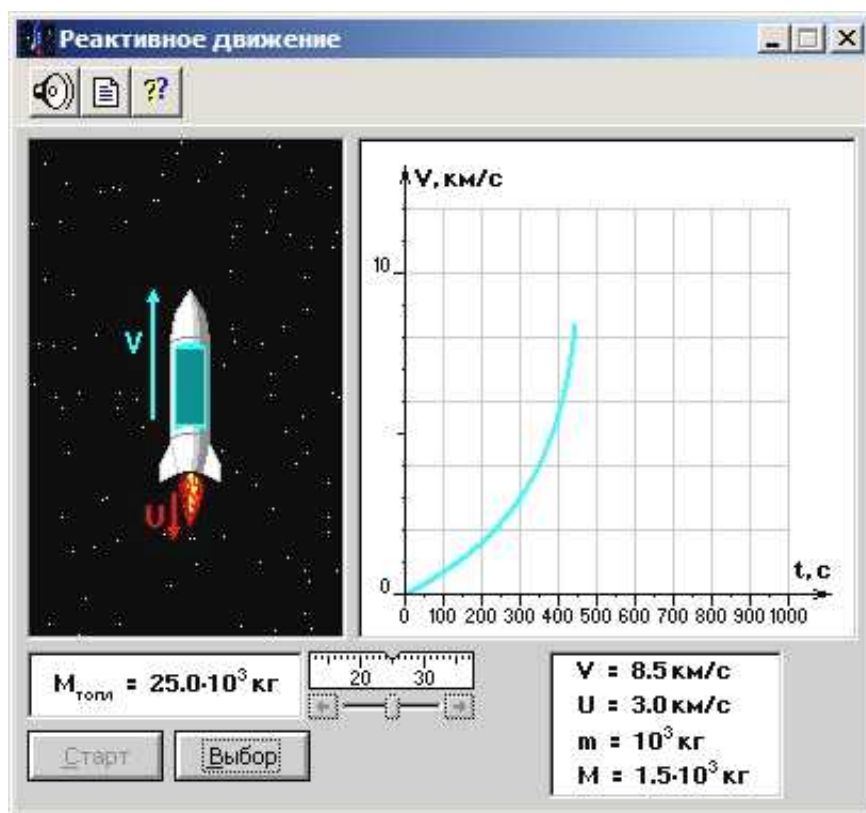


Рис. 3. Модель «Реактивное движение»

Таблица 1 – Результаты измерений

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первоначальная масса ракеты и топлива, M_0 , т	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Максимальная скорость движения ракеты, $V_{\max}$, м/с									

5. Повторите модельный эксперимент по пунктам 3 и 4 для всех девяти опытов. Результаты измерений запишите в табл. 1.

6. Для начальной массы ракеты с топливом (по указанию преподавателя) через каждые 100 секунд зафиксируйте скорость ракеты и ее массу вместе с топливом. Для этого, после установления заданной массы топлива, нужно воспользоваться пошаговым режимом работы программы.

На панели инструментов нажмите кнопку – «Остановить все» – , далее нажмите – «Старт» – , после чего, нажимая необходимое число раз, на кнопку – «Выполнять по шагам» –  проведите эксперимент. Результаты измерения запишите в таблицу 2.

7. По данным табл. 1, постройте график зависимости $V_{\max}$ от M_0 . По графику определите необходимый запас топлива для достижения первой и второй космических скоростей.

8. По данным табл. 2 постройте графики зависимости скорости $V(t)$ и массы ракеты $M = m(t)$ от времени.

9. По графику $M = m(t)$ определите скорость расхода топлива $U_{\text{топ}}$.

10. По данным табл. 2 рассчитайте значения $\ln M_0/M$, и постройте график зависимости $V(t)$ от $\ln M_0/M$. По графику определите скорость истечения газов U .

Тангенс угла наклона зависимости характеризует скорость истечения газов:

$$U = \Delta V(t) / \Delta \ln \frac{m_0}{m(t)}.$$

Таблица 2 – Результаты измерений

Номер опыта	$M_{\text{п}}, \text{ кг}$	$M_{\text{Т}}, \text{ кг}$	$M_0, \text{ кг}$	$t, \text{ с}$	$V(t), \text{ м/с}$	$M, \text{ кг}$	$\ln M_0/M$
1	1000			0			
2				100			
3				200			
4				300			
5				400			
6				500			
7				600			
8				700			
9				800			
10				900			
11				1000			

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Получите формулу Циолковского.
2. Сформулируйте закон сохранения импульса.
3. Рассчитайте первую и вторую космические скорости.
4. Объясните предназначение и особенности движения многоступенчатых ракет.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 В

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить поведение реального газа. Исследовать уравнение состояния реального газа.
2. Изучить изотермы Ван-дер-Ваальса и проанализировать условия получения критического состояния.
3. По экспериментальным данным определить критические параметры исследуемого газа и рассчитать постоянные a и b уравнения Ван-дер-Ваальса.
4. Определить, какой газ применялся в эксперименте, и найти его массу.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов втузов. В 3 т. Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. – 350 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1 Изотермы Ван-дер-Ваальса. Связь критических параметров с постоянными в уравнении Ван-дер-Ваальса

Законы идеального газа являются приближенными, а отступления от этих законов обусловлены существенным отличием свойств идеального и реального газов. В отличие от идеального газа между молекулами реального газа существуют силы взаимодействия, которые на малых расстояниях между молекулами носят характер отталкивания, а на достаточно больших расстояниях между молекулами действуют силы притяжения. Кроме этого, молекулы реального газа не могут быть представлены как материальные точки. Молекулы реального газа имеют отличный от нуля собственный объем. Учет собственного объема и сил взаимодействия позволил получить уравнение состояния для реального газа.

$$\left(p + n^2 \frac{a}{V^2} \right) (V - n \cdot b) = nRT, \quad (1)$$

где a и b – поправки на внутреннее давление и собственный объем молекул реального газа; v – число молей.

Теоретически полученное уравнение (1) называется уравнением Ван-дер-Ваальса.

Рассмотрим экспериментальные изотермы жидкости, пара и перехода жидкость – пар. На рис. 1 показан теоретический график зависимости давления от объема для реального газа, который строится на основе анализа уравнения Ван-дер-Ваальса при помощи компьютерной модели.

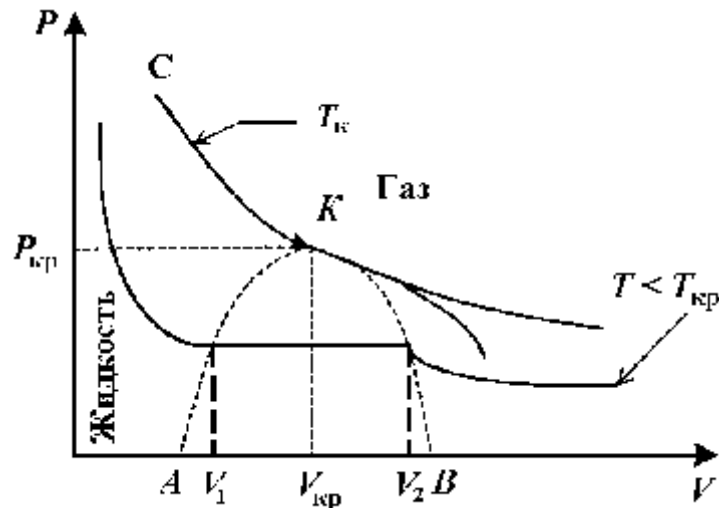


Рис. 1. Изотермы реального газа

Кривая АК соответствует точкам начала кипения, кривая KB — точкам конца кипения. Линия АКВ, которая отделяет зоны сосуществования пара и жидкости, называется бинодалью. Точки под бинодалью соответствуют равновесию жидкости и пара. В области АКВА пар является насыщенным. Равновесные участки изотерм в этой области являются изобарами. Видно также, что с ростом температуры точки начала и конца кипения сближаются и в точке К они совпадают. В этой точке исчезает различие между жидкостью и паром. В точке К резко возрастает коэффициент поглощения света. Этот процесс получил название критической опалесценции. Состояние термодинамической системы в точке К называется критическим. Критическому состоянию соответствует критическое давление $p_{кр}$, критическая температура $T_{кр}$ и критический объем $V_{кр}$. При этом критическая изотерма в точке К имеет перегиб.

Между поправками уравнения Ван-дер-Ваальса a и b , критическим давлением $p_{кр}$, критической температурой $T_{кр}$ и критическим молярным объемом $V_{кр0}$ в критическом состоянии существует следующая связь:

$$V_{кр0} = 3b, \quad p_{кр} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{кр} = \frac{8a}{27bR}. \quad (2)$$

Действительно, в точке перегиба К критической изотермы первая и вторая производные от давления по объему равны нулю, т.е.

$$\left(\frac{dp}{dV} \right)_{KP} = 0 \quad \text{и} \quad \left(\frac{d^2p}{d^2V} \right)_{KP} = 0. \quad (3)$$

Для доказательства соотношений 2 проанализируем уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля газа:

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT. \quad (4)$$

Из уравнения (4) определим давление:

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}. \quad (5)$$

Далее найдем первую и вторую производные от давления по объему и приравняем полученные значения для критического состояния к нулю:

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_{KP} = -\frac{RT_{KP}}{(V_{KP0} - b)^2} + \frac{2a}{V_{KP0}^3} = 0. \quad (6)$$

$$\left(\frac{d^2p}{dV^2}\right)_{KP} = \frac{2RT_{KP}}{(V_{KP0} - b)^3} - \frac{6a}{V_{KP0}^4} = 0. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) получим

$$\frac{RT_{KP}}{(V_{KP} - b)^2} = \frac{2a}{V_{KP0}^3}. \quad (8)$$

$$\frac{RT_{KP}}{(V_{KP} - b)^3} = \frac{3a}{V_{KP}^4}. \quad (9)$$

Разделив почленно соотношения (8) на (9), найдем критический объем:

$$V_{KP0} - b = \frac{2}{3}V_{KP0}.$$

Отсюда

$$V_{KP0} = 3b. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в соотношение (8), определим критическую температуру:

$$T_{кр} = \frac{8a}{27bR}. \quad (11)$$

И, наконец, подставляя соотношения (10) и (11) в уравнение (5) для критического состояния, найдем критическое давление:

$$p_{кр} = \frac{a}{27b^2}. \quad (12)$$

3.2 Свойства критических параметров реального газа

Почленно перемножим уравнения (10) и (12). Тогда получим

$$p_{кр}V_{KP0} = \frac{a}{27b^2}3b = \frac{3a}{27b}. \quad (13)$$

Разделив соотношение (13) на (11), установим связь между критическими параметрами реального газа:

$$\frac{p_{кр}V_{KP0}}{T_{кр}} = \frac{3a}{27b} \frac{27}{8} \frac{bR}{a} = \frac{3}{8}R.$$

Отсюда

$$p_{кр}V_{KP0} = \frac{3}{8}RT_{кр}, \quad (14)$$

где V_{KP0} – критический объем одного моля исследуемого газа.

Определим из уравнения (14) критический объем одного моля газа:

$$V_{KP0} = \frac{3RT_{кр}}{8p_{кр}}. \quad (15)$$

[illegible]

Продолжение таблицы 1

$T_1 > T_{кр}$										
p										
V										
$T_2 < T_{кр}$										
p										
V										

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Постройте в координатах $p(V)$ по данным таблицы 1 изотермы газа.
2. Рассчитайте по формуле (15) критический объем одного моля газа.
3. Рассчитайте по формуле (10) параметр b уравнения Ван-дер-Ваальса.
4. Рассчитайте по формулам (11) или (12) параметр a уравнения Ван-дер-Ваальса.
5. Определите вид газа по табл. 2 и найдите его молярную массу.

Таблица 2

Вещество	H ₂	N ₂	Ar	O ₂	CO ₂	Пары H ₂ O
a , Па·м ³ /моль	0,024	0,136	0,136	0,136	0,364	0,556
b , 10 ⁻⁵ м ³ /моль	2,63	3,85	3,22	3,16	4,26	3,06

6. Рассчитайте число молей газа по формуле

$$n = \frac{V_{кр}}{V_{кр0}}. \quad (16)$$

7. Рассчитайте массу газа по формуле.

$$m = n \cdot M. \quad (17)$$

8. Результаты расчетов запишите в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	Значения	Параметры	Значения	Параметры	Значения
$p_{кр}$		$V_{кр0}$		M , кг/моль	
$T_{кр}$		b , 10 ⁻⁵ м ³ /моль		ν , моль ⁻¹	
$V_{кр}$		a , Па·м ³ /моль		m , кг	
Вещество					

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните уравнения Ван-дер-Ваальса.
2. Поясните, какие физические процессы определяют поправки на внутреннее давление и собственный объем молекул реального газа a и b .
3. Установите связь между критическими параметрами и постоянными уравнения Ван-дер-Ваальса.
4. Объясните свойства газа в критическом состоянии. Поясните сущность явления критической опалесценции.

5. Решите задачу (№ 2.212. Иродов И.Е. Задачи по общей физике, 1988 г.). Вычислить постоянные Ван-дер-Ваальса для углекислого газа, если его критическая температура $T_{KP} = 304$ К и критическое давление $p_{KP} = 73$ атм.
6. Решите задачу (№ 2.213. Иродов И.Е. Задачи по общей физике, 1988 г.). Найти удельный объем бензола (C_8H_6) в критическом состоянии, если его критическая температура $T_{KP} = 562$ К и критическое давление $p_{KP} = 73$ атм.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 В

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА НА ЭВМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Моделирование на ЭВМ прямоугольного распределения и функции плотности распределения для шести случайных величин.
2. Исследование процесса моделирования распределения скоростей молекул идеального газа.
3. Определение наиболее вероятной, средней и среднеквадратичной скоростей молекул идеального газа при различных температурах.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. - 350 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
4. Сивухин Д.В. Молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие для вузов / Д.В. Сивухин. - 3-е изд. - М.: Наука, 1990. - 592 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

Распределение по скоростям молекул идеального газа, находящегося в состоянии термодинамического равновесия впервые было найдено Джеймсом Максвеллом. Для одномерного случая распределение молекул идеального газа по одной из компонент скорости V_x описывается нормальным распределением

$$j(V_x) = \frac{dN}{NdV_x} = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{mV_x^2}{2kT}\right], \quad (1)$$

где m - масса молекулы, T - абсолютная температура, k - постоянная Больцмана.

При этом средняя скорость молекул равна нулю, а стандартное отклонение $s = \left(kT/m\right)^{1/2}$.

Для двумерного случая распределение молекул идеального газа, компоненты скорости которых заключены в интервалы от V_x до $V_x + dV_x$ и от V_y до $V_y + dV_y$ имеет вид

$$F(V) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right) V \exp\left[-\frac{mV^2}{2kT}\right], \quad (2)$$

где $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$; $\langle V \rangle = \left(\pi kT/m\right)^{1/2}$ - средняя скорость движения молекул;

$V_e = \left(kT/m\right)^{1/2}$ - наиболее вероятная скорость движения молекул.

Для трехмерного случая распределение частиц по модулю скорости описывается распределением Максвелла:

$$F(V) = \frac{dN}{NdV} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} V^2 \exp \left[-mV^2 / 2kT \right], \quad (3)$$

где $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$; $\langle V \rangle = \left(8kT / \pi m \right)^{1/2}$ - средняя скорость движения молекул; $V_e = \left(2kT / m \right)^{1/2}$ - наиболее вероятная скорость движения молекул.

График функции (1) изображен на рис. 1.

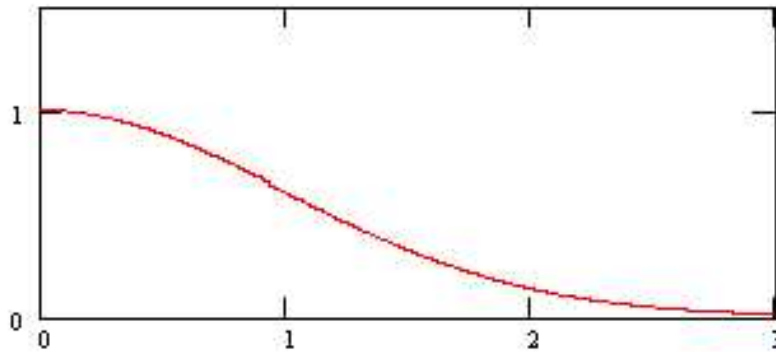


Рис. 1

График функции (3) изображен на рис. 2.

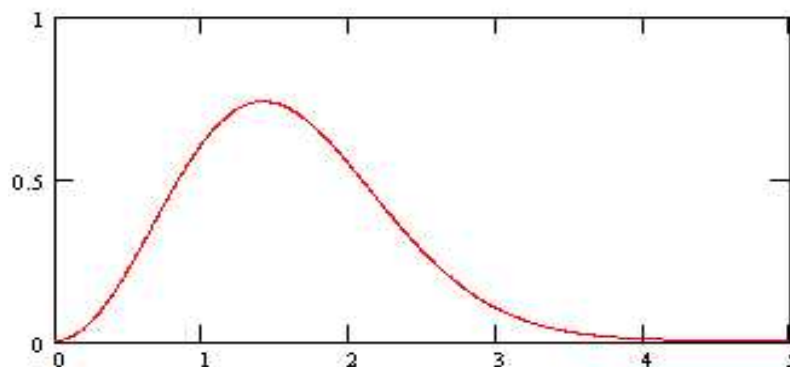


Рис. 2

3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СУММЫ ДВУХ И БОЛЕЕ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Рассмотрим распределение суммы двух случайных величин, имеющих прямоугольное распределение на примере игры «Крепс». Смысл игры состоит в подбрасывании двух игровых костей, вычислении суммы выпавших очков и определении условий игры.

Очевидно, что для одной кости выпадение каждой из шести граней (и, таким образом, цифр 1, 2, 3, 4, 5 и 6) игровой кости является событием равновероятным и равным $1/6$. Такой же вывод можно сделать и для второй игровой кости. Для удобства анализа сделаем кости различными, окрасив их, скажем, в красный и зеленый цвета. Тогда подбрасывание двух костей имеет $6 \cdot 6 = 36$ равновероятных исходов, которые приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1

Зеленая кость							
К		1	2	3	4	5	6
р а с н а я	1	2	3	4	5	6	7
	2	3	4	5	6	7	8
	3	4	5	6	7	8	9
	4	5	6	7	8	9	10
	5	6	7	8	9	10	11
	6	7	8	9	10	11	12

В выделенных клетках табл. 1 указана соответствующая сумма очков. Рассчитаем распределение вероятности P суммы очков при одновременном подбрасывании двух костей. В табл. 2 представлены результаты такого расчета.

Таблица 2

Сумма, C	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вероятность, P	1/36	2/36	3/36	4/36	5/36	6/36	5/36	4/36	3/36	2/36	1/36

Проанализируем график зависимости вероятности суммы очков P от величины этой суммы. На рис. 3 представлена эта зависимость.

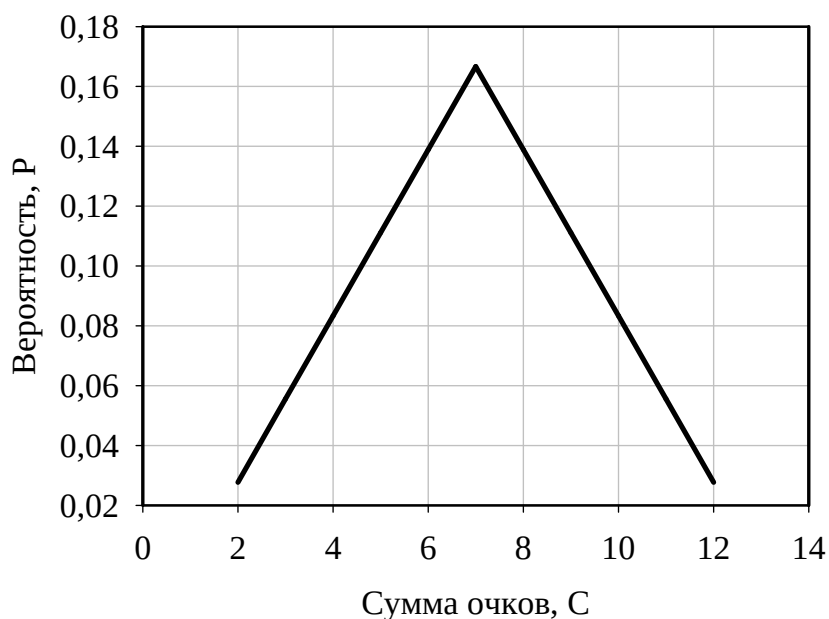


Рис. 3. Зависимость вероятности суммы очков, от величины суммы очков

Из рис. 3 видно, что вероятность P суммы очков игровых костей описывается треугольным распределением. Таким образом, при суммировании двух случайных событий, имеющих равномерное распределение, получается распределение близкое к треугольному.

При рассмотрении суммы m случайных величин, имеющих прямоугольное распределение, обнаруживается, что при повышении значения m ($m=6$ и более), получаемое распределение стремится к нормальному распределению, т.е. к распределению, описываемому законом Гаусса.

3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Распределение Максвелла для скоростей газовых молекул доказано из предположения о распределении проекции скоростей молекул по нормальному закону (1). При этом случайная величина η абсолютного значения скорости записывается через компоненты скорости как

$$h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}. \quad (4)$$

В настоящей работе для трех случайных величин η_i ($m = 6$) строится гистограмма и сравнивается с функцией распределения (3).

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустите программу *ModelMax*, ярлык программы находится на рабочем столе.

На экране монитора ЭВМ возникнет открывающееся меню «Модель распределения Максвелла», в котором появятся окошки выбора условий проведения модельного эксперимента:

- Окошко выбора температуры в кельвинах (K) и интервал изменения температур (1-900);
- Окошко выбора массы молекул газа (а.е.м.) и интервал изменения а.е.м. (1-100);
- Окошко значения постоянной Больцмана (Дж/К);
- Окошко со значением числа молекул и интервал числа молекул при проведении модельного эксперимента (5-2500);
- Кнопка «Старт», предназначенная для запуска программы моделирования распределения Максвелла при заданных условиях модельного эксперимента;
- Кнопка «Выход» для выхода из программы и окончания работы.

2. Внимательно изучите меню перед началом работы. Клавиша <F1> вызывает встроенную справку. В окошках уже имеются значения, принимаемые по умолчанию. Вам их надо заменить. О том, как это делается, прочтите во встроенной справке.

3. Установите газ - водород, температуру - 273 K, число молекул - 500.

4. Для запуска модели щелкните мышью по кнопке «Старт» или нажмите клавишу <Enter>. На экране монитора появится окно, в котором будут:

- Окошко с изображением графической информации (гистограммы и функции распределения Максвелла), над которым изображен ползунок для задания температуры и изменения ее в процессе проведения эксперимента;
- Окошко для наблюдения за характером движения молекул рассматриваемой модели термодинамической системы. Учтите, что динамическая модель движения молекул строится в плоскости XY без учета составляющей Z и не в реальном масштабе времени и скоростей молекул (определите почему);
- Значения рассчитанных наиболее вероятной, средней и среднеквадратичной скоростей молекул при заданных температурах (нижняя часть окна).

5. Для получения более подробной справки об окне моделирования нажмите клавишу <F1>.

6. Проведите модельный эксперимент для различных газов (водорода, гелия, азота, кислорода, радона и др.) при различных температурах и различном числе молекул (по заданию преподавателя). Проанализируйте характер изменения гистограмм, вид теоретической кривой распределения молекул по скоростям при изменении температуры, числа молекул и вида газа. Результаты расчета скоростей для различных газов при различных температурах запишите в таблицу 3.

7. Изобразите графики функции распределения Максвелла для одного из исследуемых газов при различных температурах и числе молекул, равном 2500.

8. Сделайте краткие выводы по работе.

Таблица 3

Газ	Температура, К	Наиболее вероятная скорость, V_v , м/с	Средняя скорость, $\langle V \rangle$, м/с	Среднеквадратичная скорость, $V_{кв}$, м/с
Водород				
Гелий				
Азот				
Кислород				
Радон				

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите функцию распределения молекул (распределение Максвелла) по скоростям для идеального газа.
2. Определите среднюю, наиболее вероятную и среднеквадратическую скорости.
3. Поясните физический смысл функции распределения.
4. Определите по графику относительное число молекул, скорости которых больше или меньше определенной скорости.
5. Рассчитайте относительное число молекул, скорости которых находятся в интервале скоростей от 0 до ∞ .
6. Объясните методику исследования распределения молекул по скоростям. Поясните моделирование равномерного, треугольного и гауссова распределения. Докажите на примере игры «Крепс» переход от равномерного к треугольному распределению случайных событий.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

1. Экспериментально исследовать действие магнитного поля на движущийся заряд.
2. Изучить действие силы Лоренца на движущийся заряд.
3. Определить удельный заряд частицы.
4. Определить параметры траектории движения.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. - 480 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ**3.1 ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Как известно, на частицу, движущуюся в магнитном поле действует сила Лоренца $F = q[\vec{V} \times \vec{B}]$. Поэтому заряженная частица, влетающая в магнитное поле, отклоняется от своего первоначального направления движения (изменяет траекторию), если только это направление не совпадает с направлением поля. В последнем случае магнитное поле вообще не действует на движущуюся частицу.

Рассмотрим случай, когда частица влетает в однородное поле, созданное в вакууме, имея направление, перпендикулярное полю.

Пусть частица влетает в магнитное поле с индукцией B (рис. 1). Линии магнитной индукции, изображенные точками, направлены перпендикулярно плоскости рисунка.

Так как скорость перпендикулярна силе Лоренца, то изменяется только направление скорости движения частицы, при этом значение модуля скорости не меняется. Отсюда следует, что траектория частицы является окружностью, на которой частицу удерживает лоренцова сила, играющая роль центростремительной силы. Радиус окружности определим, приравнявая лоренцову и центростремительную силы:

$$qvB = mv^2/r, \quad (1)$$

откуда

$$r = mv/qB. \quad (2)$$

Таким образом, радиус окружности, по которой движется частица, пропорционален скорости частицы и обратно пропорционален магнитной индукции поля.

Период обращения частицы равен отношению длины окружности к скорости частицы:

$$T = 2\pi r / v. \quad (3)$$

Откуда

$$T = 2\pi m / qB. \quad (4)$$

Следовательно, период вращения частицы в магнитном поле не зависит от ее скорости.

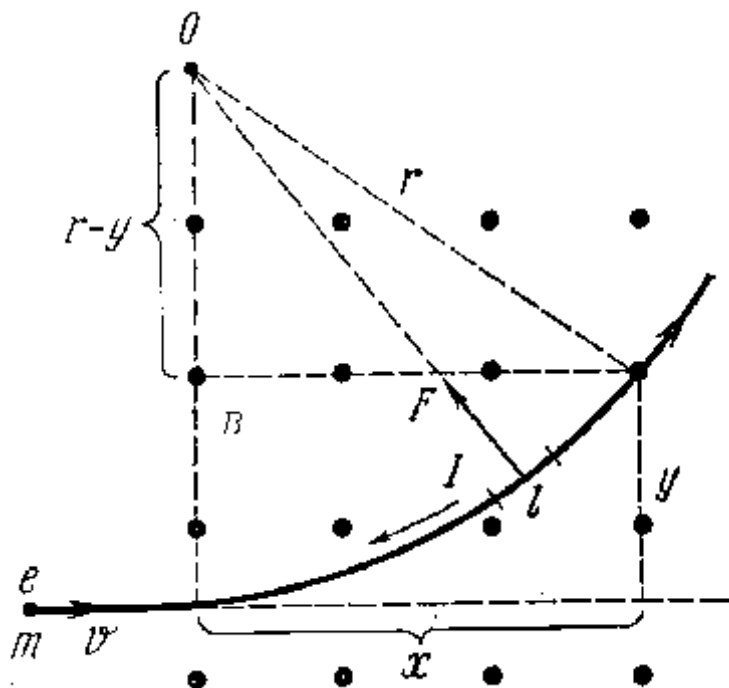


Рис. 1. Движение заряженной частицы в магнитном поле

Если заряженная частица влетает в магнитное поле под углом α , то дальнейшее движение частицы представит собой геометрическую сумму двух одновременных движений: вращения по окружности со скоростью $v \sin \alpha$ в плоскости, перпендикулярной линиям напряженности, и перемещения вдоль поля со скоростью $v \cos \alpha$ (рисунок 2).

Очевидно, что результирующая траектория частицы окажется винтовой линией с шагом спирали:

$$h = T v_z. \quad (5)$$

С помощью рассмотренных закономерностей движения заряженных частиц в магнитном поле можно экспериментально определить удельный заряд частицы:

$$\frac{q}{m} = \frac{2\pi}{T \cdot B} \quad (6)$$

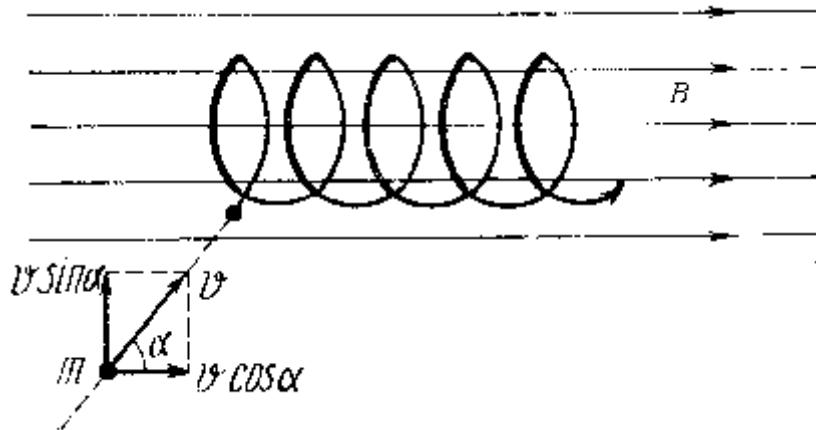


Рис. 2. Движение заряженной частицы под углом к магнитному полю

3.2. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент дает возможность, изменяя характеристики движения заряда и индукции магнитного поля, определить радиус винтовой или круговой траектории заряда и определять время движения. Измерив период движения заряда, определяют искомый удельный заряд частицы, которая движется, и шаг винта.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер
2. Программа «Открытая физика 1.1» ООО «Физикон»

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите программу «Открытая физика 1.1» на компьютер.
2. Запустите установленную программу, в разделе – «Содержание», откройте вкладку «Электричество и магнетизм», выберите компьютерную модель – «Движение заряда в магнитном поле», рис. 3.

5.1. ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ЛОРЕНЦА НА ЧАСТИЦУ, ВЛЕТАЮЩУЮ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

- 1.1. Установите скорость частицы. Для этого нажмите на клавишу «Выбор». Затем подведите курсор к бегунку шкалы v_x , нажмите левую клавишу мышки и двигайте шкалу до нужного положения. Аналогично установите $v_z = 0$ м/с.
- 1.2. Установите значение индукции ($B > 0$) магнитного поля.
- 1.3. Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после двух-трех оборотов. Запишите значение радиуса окружности.
- 1.4. Исследуйте зависимость r от B . Для этого для трех значений скоростей меняйте значение магнитной индукции. Все значения занесите в табл. 1.

Таблица 1

		$v_{x1}, \text{ м/с} =$	$v_{x2}, \text{ м/с} =$	$v_{x3}, \text{ м/с} =$
$B, \text{ мТл}$		$r_1, \text{ м}$	$r_2, \text{ м}$	$r_3, \text{ м}$
1				
2				
3				
4				
5				

1.5. Исследуйте зависимость r от v_x . Для этого для трех значений магнитной индукции меняйте значение скоростей. Все значения занесите в табл. 2.

Таблица 2

		$B_1, \text{ мТл} =$	$B_2, \text{ мТл} =$	$B_3, \text{ мТл} =$
$v_x, \text{ м/с}$		$r_1, \text{ м}$	$r_2, \text{ м}$	$r_3, \text{ м}$
1				
2				
3				
4				
5				

1.6. Постройте графики зависимостей r от B (по данным табл. 1) и r от v_x (по данным табл. 2).

1.7. Рассчитайте удельный заряд частицы по формуле (6). Для этого установите любое значение магнитной индукции $B > 0$ поля и любое значение скорости v_x . Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после одного оборота. Запишите значение периода (время одного оборота частицы).

1.8. Зарисуйте траекторию движения частицы.

5.2. ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ЛОРЕНЦА НА ЧАСТИЦУ, ВЛЕТАЮЩУЮ ПОД УГЛОМ К МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

2.1. Установите скорость частицы. Для этого подведите курсор к клавише «Выбор» и нажмите кнопкой мышки. Затем подведите курсор к бегунку шкалы v_x , нажмите левую клавишу мышки и двигайте шкалу до нужного положения. Аналогично установите v_z .

2.2. Установите значение индукции ($B > 0$) магнитного поля.

2.3. Исследуйте зависимость шага спирали от значения v_z . Для этого для трех значений магнитной индукции меняйте значения v_z (при неизменном значении скорости v_x). Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после двух-трех витков спирали. Рассчитайте и запишите значение периода вращения (время одного оборота). Значение шага спирали h рассчитайте по формуле (5). Запишите все значения в табл. 3.

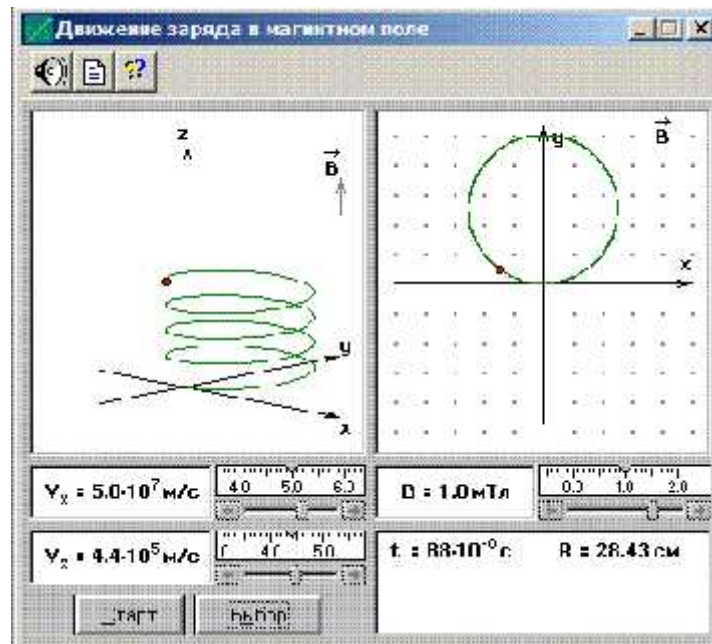


Рис. 3 Движение заряда влетающего под углом к магнитному полю

Таблица 3

$v_x, \text{м/с} =$	$B_1, \text{мТл} =$		$B_2, \text{мТл} =$		$B_3, \text{мТл} =$	
$v_z, \text{м/с}$	$T, \text{с}$	$h, \text{м}$	$T, \text{с}$	$h, \text{м}$	$T, \text{с}$	$h, \text{м}$

2.4. Постройте график зависимости шага спирали h от значения v_z по данным табл. 3.

2.5. Рассчитайте удельный заряд частицы по формуле (6). Для этого установите любое значение магнитной индукции $B > 0$ поля и любое значение скорости v_x и v_z . Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после одного оборота. Запишите значение периода (время одного оборота частицы).

2.6. Зарисуйте траекторию движения частицы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите выражение для силы Лоренца в векторной и скалярной форме.
2. Опишите поведение заряженной частицы в магнитном поле.
3. От чего зависит вид траектории протона, при движении в магнитном поле.
4. Выведите формулы для параметров траектории частицы.
5. Электрон движется в магнитном поле по окружности. Как зависит период вращения электрона от его скорости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 В

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ОПЫТА ЮНГА**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Изучить схему наблюдения интерференционных рефлексов с помощью опыта Юнга.
2. Рассчитать условия образования темных и светлых интерференционных полос в опыте Юнга.
3. Рассчитать расстояния между светлыми и темными интерференционными полосами в опыте Юнга.
4. Рассчитать угловое расстояние между светлыми (или темными) интерференционными полосами.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. – 480 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При изучении света ещё в 15 веке были установлены факты попадания света в область геометрической тени и появлении при наложении пучков света чередующихся светлых и темных полос.

Результаты сложения световых пучков были впервые точно истолкованы на основе волновых представлений Юнгом. При дальнейшем изучении этого вопроса Юнг открыл принцип интерференции (сам термин был введен Юнгом в 1802 году). Схема опыта Юнга представлена на рис. 1.

Малое отверстие A в непрозрачном экране освещается интенсивным источником света. Согласно принципу Гюйгенса это отверстие является источником распространения элементарных полусферических волн. Эти волны падают на два малых отверстия B_1 и B_2 , которые в свою очередь становятся источниками волн, накладывающихся друг на друга в области D . Так как колебания в отверстиях B_1 и B_2 вызываются одной и той же падающей на них волной, то их амплитуды и фазы одинаковы. Волны, исходящие из точек B_1 и B_2 , сходятся в каждой точке области D с разностью хода, определяемой пройденными ими путями. В зависимости от этой разности хода они усиливают или ослабляют друг друга.

Если в разности хода укладывается целое число длин волн (или четное число длин полуволн) то наблюдается интерференционный максимум (светлая полоса):

$$\Delta = \pm k\lambda, \quad (1)$$

где k – целое число, порядок интерференционного максимума, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

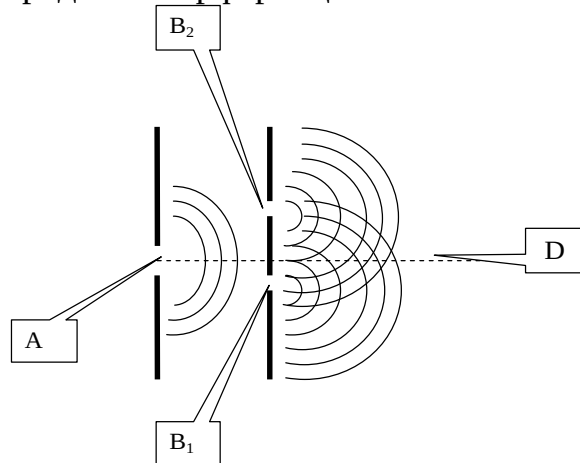


Рис. 1. Схема опыта Юнга

Если в разности хода укладывается нечетное число длин полуволн, то наблюдается интерференционный минимум (темная полоса).

$$\Delta = \pm(2k + 1) \frac{l}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, на экране в области D наблюдается явление наложения двух волновых процессов, проявляющееся в образовании усиленных и ослабленных областей в виде чередующихся светлых и темных полос.

Рассчитаем положение интерференционных рефлексов на экране $\mathcal{E}$ (рис. 2). Пусть точечные источники волн B_1 и B_2 расположены друг от друга на расстоянии d (рис. 2). Будем считать, что колебания в точках B_1 и B_2 совершаются в одной фазе с одинаковыми амплитудами. Результат интерференции волн пусть наблюдается на экране $\mathcal{E}$, расположенном от точек B_1 и B_2 на расстоянии L , большим по сравнению с d . Определим разность хода Δ , с которой приходят волны в точку C экрана, отстоящую от его середины A на расстоянии l . Поскольку $L \gg d$ и $L \gg l$, то треугольники $B_1 B_2 N$ и AOC подобны:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{l}{L}.$$

Отсюда

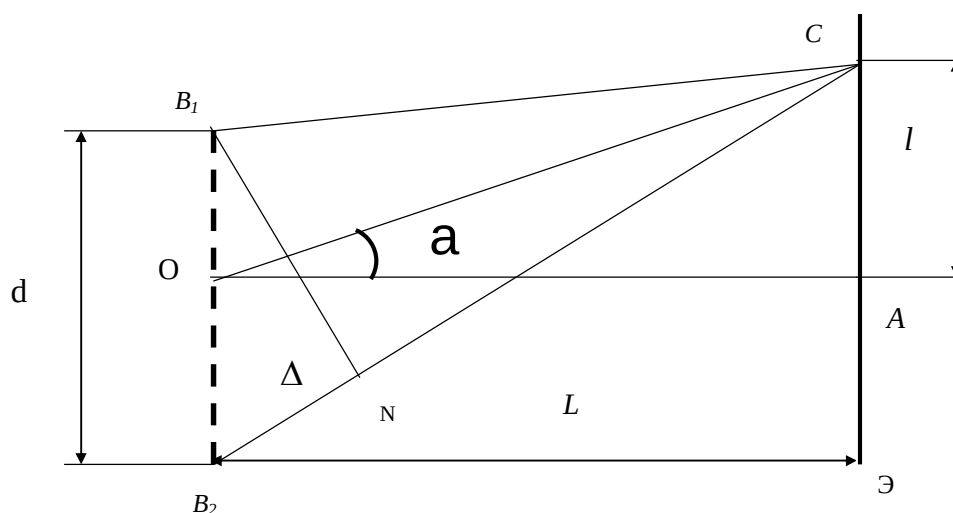
$$\Delta = \frac{l}{L} d. \quad (3)$$

Если в разности хода укладывается целое число длин волн (условие 1), то в точке C на экране $\mathcal{E}$ будет наблюдаться светлая полоса.

$$\Delta = \frac{l}{L} d = \pm k l. \quad (4)$$

Если в разности хода укладывается нечетное число длин полуволн (условие 2), то в точке C на экране $\mathcal{E}$ будет наблюдаться темная полоса.

$$\Delta = \frac{l}{L} d = \pm(2k + 1) \frac{l}{2}. \quad (5)$$

Рис. 2. Расчет разности хода лучей B_1C и B_2C

Видно, что светлые полосы располагаются на расстояниях от середины экрана т. А, равных

$$l = \pm k \frac{l}{d} L, \quad (6)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Темные полосы расположены между светлыми. Расстояние между соседними светлыми полосами равно:

$$\Delta l = \frac{l}{d} L. \quad (7)$$

Положение светлых полос можно определить также углом $\alpha = \frac{l}{L}$, т.е

$$\alpha = k \frac{l}{d}. \quad (8)$$

Угловое расстояние между соседними светлыми или темными полосами $\Delta \alpha$ равно:

$$\Delta \alpha = \frac{l}{d}. \quad (9)$$

Из соотношения (9) видно, что угловое расстояние между полосами определяется отношением $\frac{l}{t}$, т.е. отношением длины волны λ к расстоянию между источниками d . Это отношение не должно быть малым, так как в противном случае интерференционные полосы расположатся на слишком малых расстояниях друг от друга.

При наблюдении интерференционной картины в красном свете интерференционные полосы располагаются на больших угловых расстояниях $\Delta \alpha$ друг от друга, а при наблюдении в синем свете – на меньших.

Отсюда следует, что свет различного цвета отличается друг от друга длиной волны (табл. 1).

Таблица 1

Цвет цвета	Приблизительный интервал длин волн, λ , мкм
Красный	0,76-0,63
Оранжевый	0,63-0,60
Желтый	0,60-0,57
Зеленый	0,57-0,50
Сине-зеленый	0,50-0,45
Синий	0,45-0,43
Фиолетовый	0,43-0,40

Лучи с длинами волн больше 0,76 мкм и меньше 0,40 мкм человеческий глаз не воспринимает. Первые из них называются инфракрасными, вторые – ультрафиолетовыми.

Свет какой-либо одной определенной длины волны называется монохроматическим.

4. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент позволяет провести виртуальный интерференционный опыт Юнга, в котором монохроматический луч света проходит через две близко расположенные щели. Эти щели генерируют две когерентные световые волны, которые, накладываясь в области перекрытия двух световых пучков, образуют интерференционную картину в виде чередующихся светлых и темных полос. Компьютерная программа предусматривает расчет положения интерференционных полос, их ширину и угол схождения световых лучей.

5. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1», ООО «Физикон».

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите компьютерную программу «Открытая физика 1.1» на ЭВМ.
2. Запустите установленную программу, откройте содержание, запустите раздел «Оптика», откройте программу виртуальной лабораторной работы «Интерференционный опыт Юнга», рис. 3.
3. Установите в соответствии с данными табл. 1 длину волны монохроматического света λ , нм в интервале 400 – 760 нм и расстояние между щелями d , мм в интервале 1-2 мм. При проведении компьютерного эксперимента расстояние L между экраном и щелями устанавливается программным способом. Это расстояние равно 4 м.
4. Внимательно изучите интерференционную картину виртуального опыта Юнга. Обратите внимание на положения светлых и темных полос первого и второго порядков интерференции.
5. Рассчитайте расстояние от интерференционной светлой полосы первого и второго порядков спектра до середины экрана. Результаты расчета запишите в табл. 2.

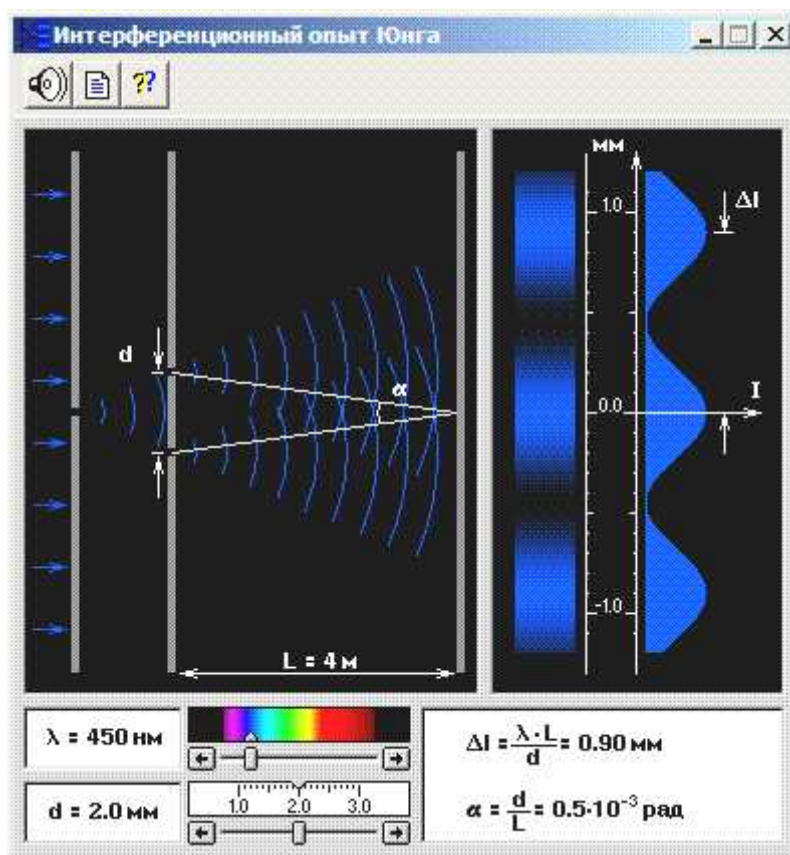


Рис. 3. Модель «Интерференционный опыт Юнга»

5. Рассчитайте расстояние от интерференционной светлой полосы первого и второго порядков спектра до середины экрана. Результаты расчета запишите в табл. 2.

Таблица 2

Номер опыта	Цвет	Светлая полоса			
		Длина волны, λ , нм	Расстояние между щелями, d , мм	Порядок спектра, k	Расстояние от светлой полосы до центра экрана, l , мм
1	Красный				
2	Оранжевый				
3	Желтый				
4	Зеленый				
5	Голубой				
6	Синий				
7	Фиолетовый				

6. Рассчитайте расстояние от интерференционной темной полосы первого и второго порядков спектра до середины экрана. Результаты расчета запишите в табл. 3.

Таблица 3

Темная полоса					
Номер опыта	Цвет	Длина волны, λ , нм	Расстояние между щелями, d , мм	Порядок спектра, k	Расстояние от темной полосы до центра экрана, l , мм
1	Красный				
2	Оранжевый				
3	Желтый				
4	Зеленый				
5	Голубой				
6	Синий				
7	Фиолетовый				

7. Рассчитайте (по заданию преподавателя) относительную и абсолютную погрешность l . Результаты расчета запишите в табл. 4.

Таблица 4

Номер опыта	$\Delta\lambda$, нм	ΔL , м	Δd , мм	$e = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta d}{d}, \%$	$\Delta(\Delta l)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

8. Повторите модельный эксперимент по пунктам 1 - 4 для различных длин волн (цветов) (по заданию преподавателя). Результаты измерений запишите в табл. 3 и 4.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните схему проведения опыта Юнга.
2. Получите выражение для определения темных и светлых интерференционных полос в опыте Юнга.
3. Объясните способы получения когерентных источников света: зеркала Френеля, бипризма Френеля, опыт Ллойда, опыт В.П. Линника, билинза Бийе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 В

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучение законов внешнего фотоэффекта.
2. Снятие и изучение вольтамперных характеристик вакуумного фотоэлемента.
3. Определение работы выхода электронов из материала катода вакуумного фотоэлемента.
4. Определение постоянной Планка.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1982. – 304 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ЗАКОНЫ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Это явление было открыто Г. Герцем в 1887 году и объяснено А. Эйнштейном на основе квантовых представлений о природе света. На рис. 1 представлена схема установки для исследования фотоэффекта.

Свет проходит через кварцевое стекло в стеклянный баллон и освещает электрод **К**, изготовленный из исследуемого материала. Эти электроды с помощью потенциометрической схемы подключены к источникам постоянного напряжения, позволяющие изменять не только величину приложенного к электродам напряжения, но и полярность.

При освещении электрода **К** из него испускаются электроны. Если на электрод **А** подать положительный, а на электрод **К** отрицательный потенциал, то испущенные электродом **К** электроны под действием электрического поля будут двигаться к аноду, образуя в электрической цепи фототок. Возникающий в цепи электрический ток измеряется амперметром (чувствительным гальванометром).

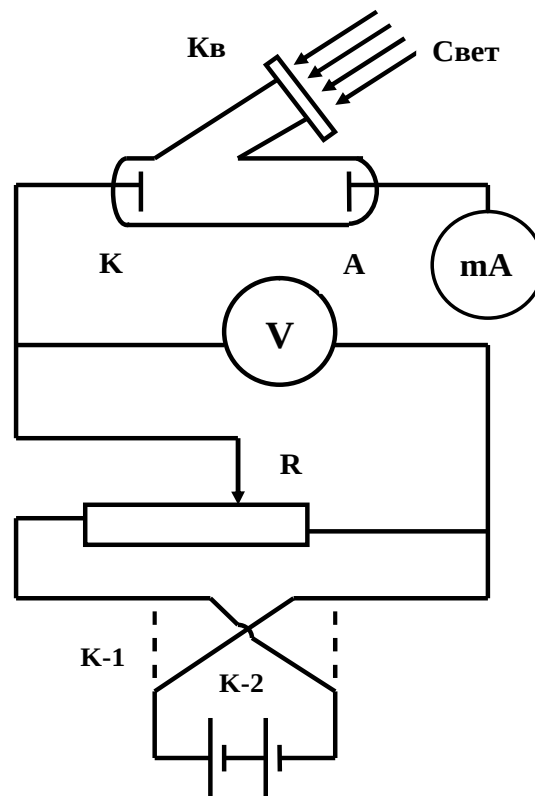


Рис. 1. Схема установки для исследования фотоэффекта

На рис. 2 изображена зависимость фототока от приложенного напряжения (вольтамперная характеристика) при различной мощности монохроматического светового потока (ряд 1 – 0,5 мВт, ряд 2 – 1,0 мВт).

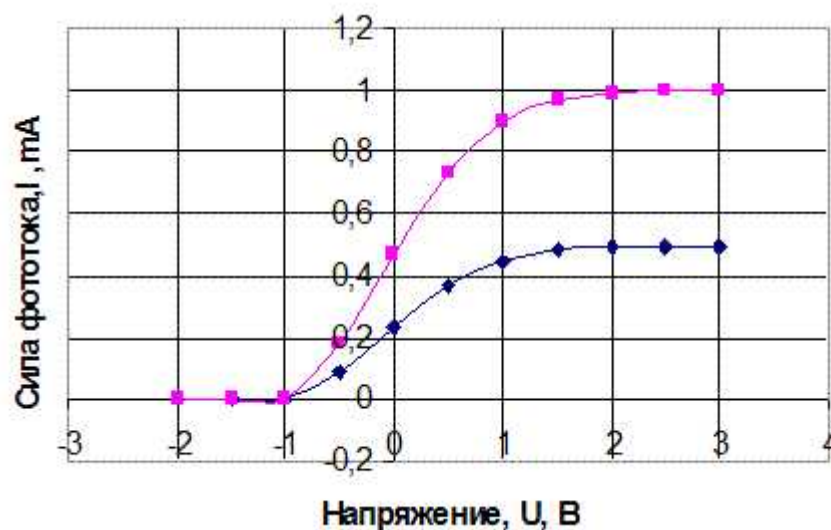


Рис. 2. Вольтамперная характеристика

Зависимость фототока от приложенного напряжения носит нелинейный характер. С ростом приложенного напряжения сила фототока увеличивается. При некотором напряжении все испускаемые в единицу времени электроны попадают на анод и сила фототока не изменяется. Этот фототок получил название фототока насыщения. При нулевом напряжении фототок не исчезает. Для того, чтобы фототок стал равным нулю, необходимо на электрод А подключить от-

рицательный (задерживающий) потенциал. С увеличением мощности светового потока наблюдается рост фототока насыщения при неизменном значении задерживающего потенциала (задерживающего напряжения).

Количественные закономерности фотоэффекта были установлены русским физиком А.Г. Столетовым (1839 - 1896):

1. Сила фототока насыщения пропорциональна световому потоку, падающему на поверхность тела.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от мощности светового излучения.

3. Если частота света меньше некоторой определенной для исследуемого вещества минимальной частоты, то фотоэффект не наблюдается. Для каждого вещества существует «красная граница», т.е. минимальная частота, ниже которой фотоэффект не происходит. При этом величина задерживающего напряжения не зависит от интенсивности светового потока, а зависит от частоты света.

Объяснение основных законов фотоэффекта было дано А. Эйнштейном в 1905 году. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта получено на основе закона сохранения энергии для электрон-фотонного взаимодействия. Энергия падающего фотона $h\nu$ расходуется на работу выхода электрона A из металла (материала электрода К) и на сообщение электрону максимальной кинетической энергии $\frac{mv_{\max}^2}{2}$:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (1)$$

Учитывая, что $eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2}$, а $\frac{c}{\lambda} = \nu$, соотношение (1) будет иметь вид:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU_3. \quad (2)$$

Формулы (1) или (2) могут быть использованы для расчета постоянной Планка.

Для двух длин волн формулы Эйнштейна для внешнего фотоэффекта имеют вид $\frac{hc}{\lambda_1} = A + eU_{31}$, $\frac{hc}{\lambda_2} = A + eU_{32}$, где λ_1 и λ_2 - длины волн и соответствующие им запирающие напряжения U_{31} и U_{32} . Исключив из этих уравнений работу выхода, получим следующую формулу для расчета постоянной Планка:

$$h = \frac{e\lambda_1\lambda_2(U_{32} - U_{31})}{c(\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (3)$$

При этом работа выхода электрона из электрода К может быть рассчитана по формуле

$$A = \frac{hc}{\lambda} - eU_3. \quad (4)$$

3.2 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент позволяет исследовать зависимость силы фототока от приложенного прямого и обратного напряжения, проанализировать вольтамперные характеристики. При проведении эксперимента на экран дисплея выводятся данные о приложенном напряжении, фототоке, длине волны, мощности излучения.

Эксперимент предусматривает проведение расчетов постоянной Планка, работы выхода электрона из материалов электрода К, анализ приборной и случайной погрешности проводимых измерений и расчетов.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1» ООО «Физикон».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Установите компьютерную программу «Открытая физика 1.1» на ЭВМ.
2. Запустите установленную программу, откройте содержание, запустите раздел «Квантовая физика», откройте программу виртуальной лабораторной работы «Фотоэффект», рис. 3.

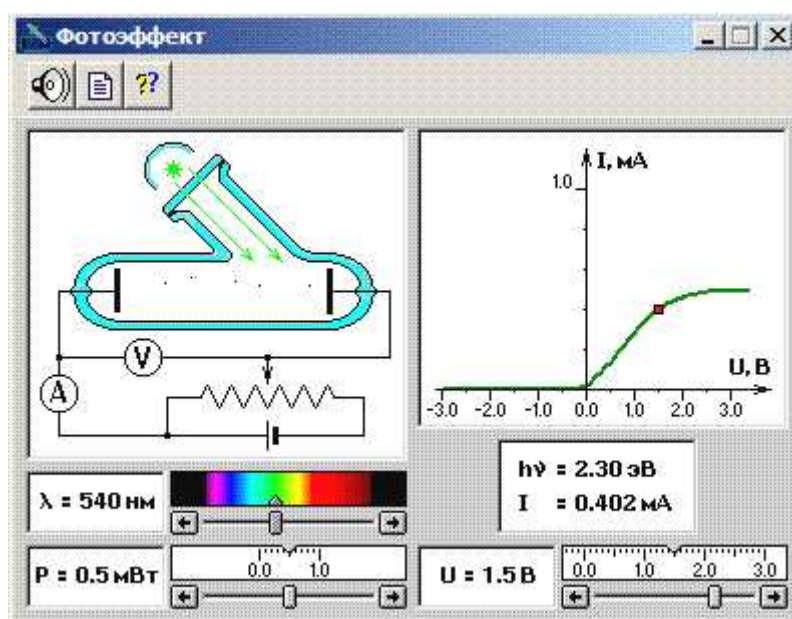


Рис. 3. Модель «Фотоэффект»

3. Включите режим компьютерного эксперимента для фиолетового цвета, установите мощность светового потока $P = 0,5$ мВт.
4. Произведите съемку вольтамперной характеристики. Напряжение изменяйте в интервале от -3 В до +3 В. Показания силы фототока даны в нижнем окне панели вольтамперной характеристики. Результаты измерений занесите в табл. 1.
5. По вольтамперной характеристике определите для данного цвета величину задерживающего напряжения. Результаты измерений запишите в табл. 1.
6. Повторите измерения для синего, зеленого, оранжевого и красного цвета электромагнитного излучения.

7. Повторите измерения по пунктам 3-6 для мощности $P = 1$ мВт. Результаты измерений запишите в табл. 1.

Таблица 1

Номер опыта	Мощность, P , мВт	Длина волны, λ , м	Напряжение, U , В	Сила тока, I , мА	Задерживающее напряжение, U , В
1					
2					
3					
...					

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По формуле 3, для пары значений длин волн рассчитайте значение постоянной Планка. Результат занесите в табл. 2. Расчеты повторите для различных значений длин волн.

2. Рассчитайте среднее значение постоянной Планка по формуле:

$$\langle h \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n}.$$

3. Рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta h = |\langle h \rangle - h_i| \text{ и их квадраты } (\Delta h_i)^2.$$

4. Вычислите среднюю квадратичную погрешность:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{\sum \Delta h_i^2}{n(n-1)}}.$$

5. Вычислите среднюю абсолютную погрешность (величину доверительного интервала) для заданной надежности α :

$$\Delta h = t_a(n) \Delta S.$$

6. Рассчитайте относительную погрешность измерения:

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} \cdot 100\%.$$

Таблица 2 – Расчет постоянной Планка

Номер опыта	h_i , Дж·с	$\langle h \rangle$, Дж·с	Δh_i , Дж·с	$(\Delta h_i)^2$	ΔS	Δh , Дж·с	ϵ , %
1							
2							
3							
4							
5							

7. Расчеты повторите для мощности $P = 1$ мВт.

8. По формуле 4, используя полученное значение постоянной Планка, рассчитайте работу выхода электрона.

9. Полученные значения запишите в табл. 3.

10. Проведите обработку результатов измерений по методике изложенной выше.

11. Расчеты повторите для мощности $P = 1$ мВт.

Таблица 3 – Расчет работы выхода

Номер опыта	A_i , эВ	$\langle A \rangle$, эВ	ΔA_i , эВ	$(\Delta A_i)^2$	ΔS	ΔA , эВ	ε , %
1							
2							
3							
4							
5							

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем суть явления фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
2. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.
3. Дайте определение красной границы фотоэффекта и работы выхода.
4. Выведите рабочую формулу для определения постоянной Планка.
5. Постройте и поясните вольтамперные характеристики наблюдаемые при фотоэффекте.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 В

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить эффект Комптона с помощью компьютерного эксперимента.
2. Определить зависимость изменения длины волны падающего излучения от угла рассеяния.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1982. – 304 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 ЭФФЕКТ КОМПТОНА

В конце XVII века почти одновременно возникли две теории о природе света. Ньютон предложил **теорию истечения**, согласно которой свет представляет собой поток световых частиц (корпускул), летящих от светящегося тела по прямолинейным траекториям. Гюйгенс выдвинул **волновую теорию**, в которой свет рассматривался как упругая волна, распространяющаяся в мировом эфире.

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комптон, исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также излучение более длинных волн. опыты показали, что разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только величиной угла рассеяния φ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2(\varphi/2), \quad (1)$$

где λ' – длина волны рассеянного излучения; λ_C – **комптоновская длина волны**, (при рассеянии фотона на электроне $\lambda_C = 2,426$ пм).

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

Объяснение эффекта Комптона дано на основе квантовых представлений о природе электромагнитных волн. Если считать, как это делает квантовая теория, что излучение представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона -

результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества (для легких атомов электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их в первом приближении можно считать свободными). В процессе этого столкновения фотон передает электрону часть своих энергии и импульса в соответствии с законами их сохранения.

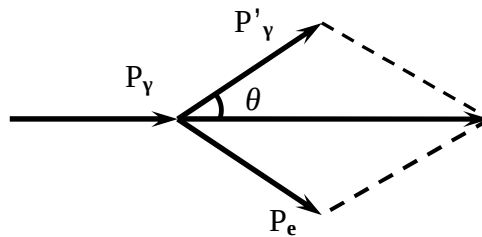


Рис. 1

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц (рис. 1) – налетающего фотона, обладающего импульсом $p_\gamma = h\nu/c$ и энергией $\varepsilon_\gamma = h\nu$, с покоящимся свободным электроном (энергия покоя $W_0 = m_0c^2$; m_0 – масса покоя электрона). Фотон, столкнувшись с электроном, передает ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается). Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. Пусть импульс и энергия рассеянного фотона равны $p'_\gamma = h\nu'/c$ и $\varepsilon'_\gamma = h\nu'$. Электрон, ранее покоившийся, приобретает импульс $p_e = mv$, энергию $W = mc^2$ и приходит в движение – испытывает отдачу. При каждом таком столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

Согласно закону сохранения энергии,

$$\hbar\omega + m_0c^2 = \hbar\omega' + mc^2, \quad (2)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Согласно закону сохранения импульса,

$$\hbar \mathbf{k} = m\mathbf{v} + \hbar \mathbf{k}', \quad (3)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Разделив первое уравнение на c , можно привести его к виду

$$mc = m_0c + \hbar(k - k'). \quad (4)$$

Возведение этого уравнения в квадрат дает:

$$(mc)^2 = (m_0c)^2 + (\hbar k)^2 + (\hbar k')^2 - 2(\hbar k)(\hbar k') + 2m_0c\hbar(k - k'). \quad (5)$$

Из рис. 1 следует, что

$$(mv)^2 = (\hbar k)^2 + (\hbar k')^2 - 2(\hbar k)(\hbar k') \cos \varphi. \quad (6)$$

Вычтя уравнение (6) из уравнения (5), получим

$$m^2(c^2 - v^2) = m_0^2c^2 - 2\hbar^2kk'(1 - \cos \varphi) + 2m_0c\hbar(k - k'). \quad (7)$$

Можно убедиться, что $m^2(c^2 - v^2) = m_0^2c^2$, и тогда все приходит к равенству:

$$m_0c(k - k') = \hbar kk'(1 - \cos \varphi). \quad (8)$$

Умножив равенство на $2p$ и разделив на m_0ckk' и, учитывая, что $2p/k = \lambda$, получим формулу

$$\Delta l = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos q) = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{q}{2}. \quad (9)$$

Выражение (9) есть не что иное, как полученная экспериментально Комптоном формула (1). Подстановка в нее значений h , m_0 и c дает комптоновскую длину волны электрона $\lambda_c = h/(m_0c) = 2,426$ пм.

Наличие в составе рассеянного излучения «несмещенной» линии (излучения первоначальной длины волны) можно объяснить следующим образом. При рассмотрении механизма рассеяния предполагалось, что фотон соударяется лишь со свободным электроном. Однако если электрон сильно связан с атомом, как это имеет место для внутренних электронов (особенно в тяжелых атомах), то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Так как масса атома по сравнению с массой электрона очень велика, то атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона. Поэтому в данном случае длина волны λ' рассеянного излучения практически не будет отличаться от длины волны λ падающего излучения.

Эффект Комптона наблюдается не только на электронах, но и на других заряженных частицах, например протонах, однако из-за большой массы протона его отдача «просматривается» лишь при рассеянии фотонов очень высоких энергий.

3.2. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент позволяет изменять угол рассеяния и длину волны падающего излучения. Компьютерная программа предусматривает расчет длины волны рассеянного излучения, вывод на монитор векторной диаграммы импульсов фотона и покоящейся частицы до и после взаимодействия, а также графика относительных интенсивностей падающей и рассеянной волны в зависимости от заданных длины волны падающего излучения и угла рассеяния.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1» ООО «Физикон».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Установите программу «Открытая физика» на компьютер.
2. Запустите установленную программу, в разделе «Содержание» откройте закладку «Квантовая физика», выберите компьютерную модель «Комптоновское рассеивание», рис. 2.
3. Установите начальные значения угла рассеяния и длины волны λ падающего излучения θ : 30° и $0,03$ нм, соответственно. Нажмите «Старт» и наблюдайте эффект Комптона. Проанализируйте полученный график относительных интенсивностей падающей и рассеянной волны.

4. В соответствии с исходными данными табл. 1 определите длину волны рассеянного излучения λ' в зависимости от угла рассеяния θ и длины волны падающего излучения λ . Полученные данные занесите в таблицу.

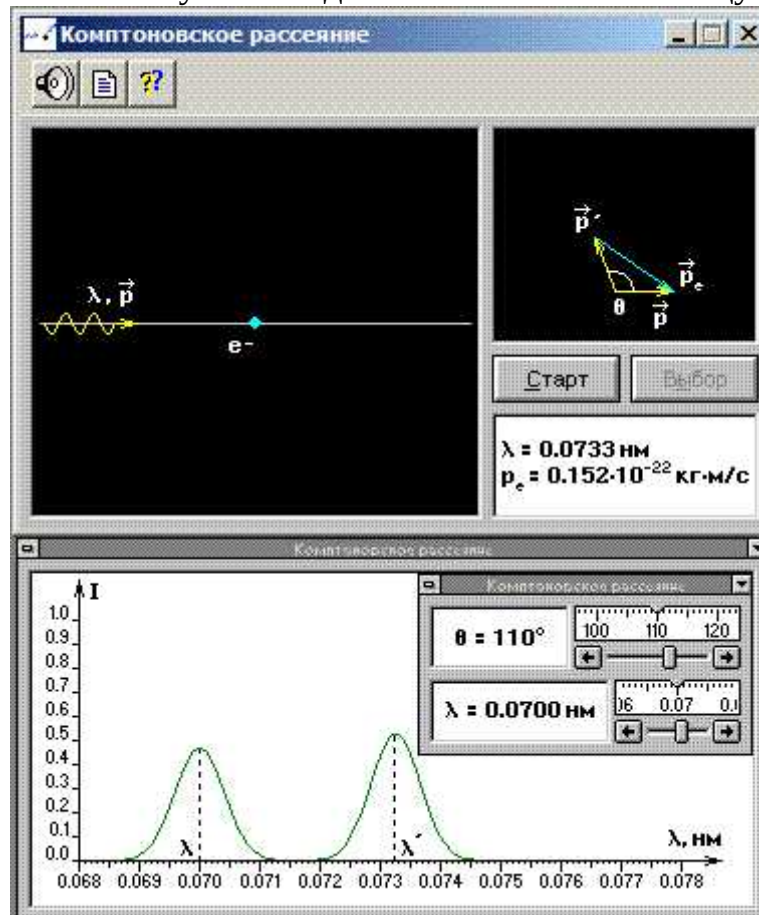


Рис. 2. Модель «Комптоновское рассеивание»

5. Определите изменение длины волны $\Delta\lambda$ для каждого угла рассеяния θ и занесите в последнюю строку табл. 1.

Таблица 1

θ	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°
λ , нм									
0,03									
0,04									
0,05									
0,06									
0,07									
0,08									
0,09									
0,1									
$\Delta\lambda$									

6. Сделайте вывод о зависимости изменения длины волны $\Delta\lambda$ от угла рассеяния θ .

7. Для длины волны падающего излучения 0,03 нм при всех заданных углах рассеяния θ взять из табл. 1 значения λ' и $\Delta\lambda$, рассчитать $\sin(\theta/2)$, $\sin^2(\theta/2)$ и занести полученные данные в табл. 2.

8. По данным табл. 2 построить зависимость изменения длины волны $\Delta\lambda$ от $\sin^2(\theta/2)$.

9. Выразите из формулы (9) $l_k = \frac{2h}{m_0c}$ и, используя график, рассчитайте комптоновскую длину волны для электрона как tg угла наклона полученной прямой.

Таблица 2

θ	$\theta/2$	$\sin(\theta/2)$	$\sin^2(\theta/2)$	λ , нм	λ' , нм	$\Delta\lambda$, нм
30						
45						
60						
75						
90						
105						
120						
135						
150						

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите примеры явлений, подтверждающих волновую теорию природы света, и примеры, подтверждающие корпускулярную теорию.
2. Что называется эффектом Комптона?
3. Какие законы выполняются при упругом рассеянии света на свободных электронах? Запишите их.
4. Получите выражение для изменения длины волны падающего излучения.
5. Получите математическое выражение и рассчитайте комптоновскую длину волны электрона.
6. От чего зависит величина изменения длины волны падающего излучения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 В

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Исследование распределения скоростей электронов до и после соударения их с атомами и молекулами разреженного газа.
2. Исследование и анализ упругого и неупругого соударения электронов с молекулами разреженного газа.
3. Изучение вольтамперной характеристики установки Франка Герца. Доказательство дискретности энергетических уровней атомов. Проверка постулатов Бора.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1982. – 304 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ**3.1. ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА**

В основе современной теории атома лежит экспериментальный факт, установленный в опытах Джеймса Франка и Густава Герца в 1914 г. В этих опытах исследовалось распределение скоростей электронов до и после соударения их с атомами и молекулами разреженного газа. Было найдено, что при скоростях электронов, меньших некоторой критической скорости, соударение происходит вполне упруго – электрон не передаёт атому своей энергии, а изменяет лишь направление импульса. При скоростях, достигающих некоторой критической скорости, столкновение электрона с атомом становится неупругим – электрон теряет всю энергию, передавая её атому, который после этого переходит в другое состояние с большей энергией. Отсюда следовало, что атом либо вообще не воспринимает энергию, либо воспринимает её в количествах, равных разности энергий в двух стационарных состояниях, характерной для данного атома.

Схема установки Франка – Герца показана на рис. 1. В вакуумный баллон (трубку) впаяны термокатод **К**, сетки **С** и анод **А**. Трубку заполняли парами исследуемых веществ (ртути, гелия и др.) под небольшим давлением (~ 1 мм рт. ст.). Электроны, вылетевшие из катода, ускорялись разностью потенциалов **$U(1)$** , приложенной между катодом **К** и сеткой **C_1** . Эта разность потенциалов регулируется потенциометром **П1**. Между сеткой **C_2** и анодом **А** включается источник постоянного напряжения примерно 0,5 В. Этот источник создаёт электрическое поле, задерживающее электроны при их движении к аноду. При этом анод дос-

тигают только те электроны, энергия которых больше величины энергии задерживающего потенциала.

$$E = eU . \quad (1)$$

Исследовалась зависимость тока I , регистрируемого гальванометром (микроамперметром) G , помещённым в цепь анода A , от напряжения U .

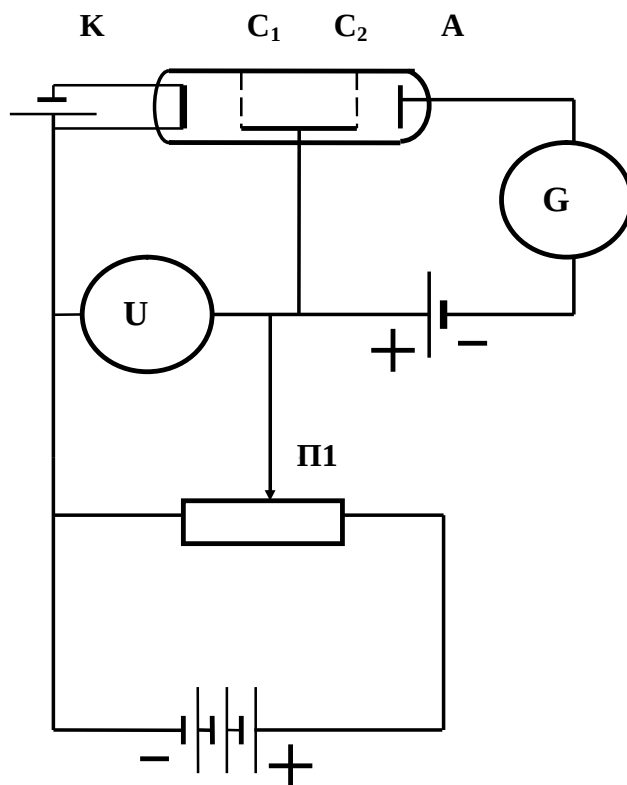


Рис. 1. Схема установки Франка и Герца

Полученный результат для случая с парами ртути показан на рис. 2.

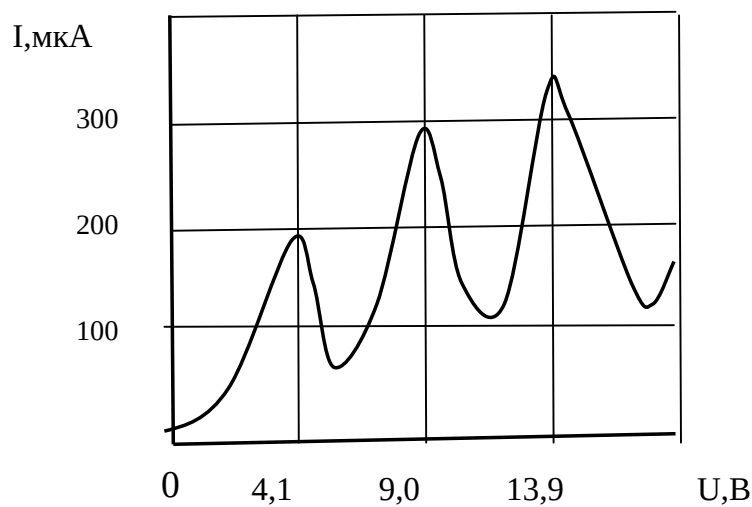


Рис. 2. Зависимость силы тока от напряжения

Максимумы тока I наблюдались при потенциалах $U = 4,1; 9,0; 13,9$ В. Разность между этими значениями постоянна и равна 4,9 В (с точностью до 0,1 В). Если к приложенному извне ускоряющему потенциалу прибавить контактную разность потенциалов, которая в опыте равнялась 0,8 В, то получается ряд значений энергий электрона $E = 4,9; 9,8; 14,7$ эВ, в котором первое значение совпадает с разностью между соседними значениями. Максимумы на кривой рисунка 2 имеют простое истолкование. Пока энергия электронов меньше 4,9 эВ, они испытывают с атомами ртути упругие соударения, их энергия достаточна для преодоления разности потенциалов между электродами **С** и **А** и ток возрастает с увеличением потенциала по обычному закону. При потенциалах кратных 4,9 В удары становятся неупругими, электроны отдают всю свою энергию атомам ртути и задерживаются сеткой. В результате ток в цепи анода резко падает. Если энергия электронов заметно превосходит величину, кратную 4,9 эВ, то такие электроны, потеряв часть своей энергии при неупругом столкновении с атомами ртути, сохраняют достаточно энергии для преодоления задерживающего напряжения и ток начинает возрастать.

Ускоряющий потенциал 4,9 В называется резонансным потенциалом атома ртути. Атом любого химического элемента характеризуется своим значением резонансного потенциала.

Дальнейшие исследования показали, что у атомов данного сорта существует не одно дискретное возбуждённое состояние, а множество таких состояний. У атома ртути, например, кроме резонансного потенциала 4,9 В имеется второй критический потенциал 6,7 В.

Таким образом, опыты Франка и Герца показали, что энергия атомов изменяется дискретно. Тем самым было получено экспериментальное подтверждение постулатов Бора.

3.2 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент опыта Франка и Герца позволяет исследовать зависимость силы тока от приложенного напряжения, проанализировать полученные вольтамперные характеристики. При проведении эксперимента на экран дисплея выводятся данные о приложенном напряжении и возникшем электрическом током.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Frank & Hertz», выполненная для компьютерного моделирования физических опытов Дж. Франка и Г. Герца для подтверждения постулатов Бора.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите компьютерную программу «Frank & Hertz» на ЭВМ.
2. Запустите программу, используя ярлык расположенный на рабочем столе, в меню программы выберите пункт «Дослід» рис. 3.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие законы сохранения выполняются при упругом и неупругом соударениях тел?
2. Что называется абсолютно упругим и неупругим ударами?
3. Объясните, на каких участках вольтамперной характеристики (рис. 2) имеют место упругие и на каких – неупругие столкновения электронов с атомами?
4. Какова длина волны линии излучения при переходе электрона в атоме ртути из первого возбужденного состояния в основное?
5. Сформулируйте постулаты Бора.
6. С помощью постулатов Бора получите выражения для определения скорости, радиуса и энергии движущегося электрона в атоме водорода и водородоподобных атомов.
7. Опишите схему установки Франка и Герца, поясните смысл опытов Франка и Герца и дайте пояснения результатов этих опытов.
8. С какой целью на электрод А (на коллектор А) подается задерживающее напряжение и из каких соображений оно выбирается?
9. Как проявляется контактная разность потенциалов в опыте Франка и Герца?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 В
ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ. ЗНАКОМСТВО
С УСТРОЙСТВОМ И ПРИНЦИПОМ РАБОТЫ ФОРВАКУУМНОГО
И ПАРОМАСЛЯНОГО (ДИФФУЗИОННОГО) НАСОСА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить устройство, принцип работы форвакуумного и паромасляного (диффузионного) насосов.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. – 350 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
4. Сивухин Д.В. Молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие для вузов / Д.В. Сивухин. - 3 -е изд. - М.: Наука, 1990. - 592 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ НАСОСОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАЗРЯЖЕНИЯ (ФОРВАКУУМНЫХ НАСОСОВ)

Для получения низкого вакуума ($10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст.) в физических лабораториях и на производстве используются форвакуумные насосы. Наибольшее распространение получили вращательные пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и плунжерные насосы. Рассмотрим устройство и принцип работы пластинчато-роторного насоса. На рис. 1 изображена схема форвакуумного пластинчато-роторного насоса. Работает насос следующим образом. Стальной цилиндр 2 (ротор) вращается в цилиндрическом кожухе 1, к которому приварены два патрубка 5 (входной) и 7 (выходной). Верхняя часть ротора плотно прилегает к цилиндрическому кожуху. В диаметральной плоскости ротора проделаны пазы, в которых могут двигаться пластины 3, прижимаемые пружиной 4 к внутренней поверхности цилиндрического кожуха 1. Пластины 3 тщательно шлифованы к внутренней поверхности кожуха 1 и смазываются вакуумным маслом. При вращении ротора воздух по патрубку 5 поступает из откачиваемого объема в увеличивающийся объем 6 полости насоса. Выталкивание сжатого другой лопастью насоса газа происходит в атмосферу через выходной патрубок 7.

Наиболее распространенными насосами являются пластинчато-роторные насосы типа ВН-494, пластинчато-статорные насосы типа ВН-461М, РВН-20 и другие.

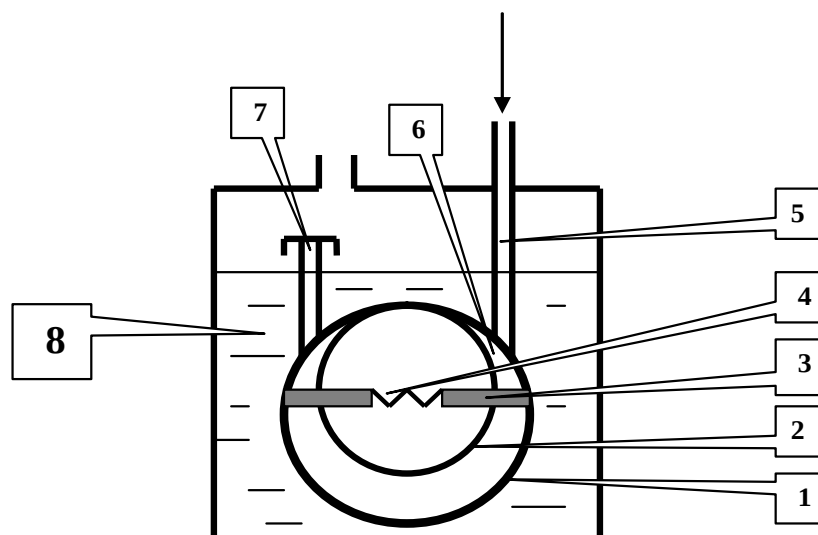


Рис. 1. Схема форвакуумного пластинчато – роторного насоса:

- 1 – цилиндрический кожух корпуса насоса; 2 – ротор, цилиндр с прорезями для пластин;
3 – пластины; 4 – пружина; 5 – всасывающий патрубок;
6 – всасывающий объем; 7 – выхлопной патрубок; 8 – вакуумное масло

3.2 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ НАСОСОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Развитие нанотехнологий, соединение твердотельной микроэлектроники с законами самоорганизации при создании различных материалов, биоробототехнических систем связано косвенно или непосредственно с получением высокого вакуума. Кроме того, традиционно, в современных вакуумных приборах (электронные микроскопы, электронографы, вакуумные посты для напыления различных полупроводниковых материалов, металлов и сплавов), требуется получать давление порядка $10^{-4} - 10^{-6}$ мм рт. ст. С этой целью последовательно с форвакуумным насосом часто включаются паромасляные (диффузионные) насосы, которые ранее выпускались под марками ЦВЛ – 100, Н – 5С и др.

На рис. 2 приведена простейшая схема паромасляного насоса. Электрическая печь 1 нагревает вакуумное масло 2, находящееся на дне металлического сосуда такого насоса. Применяемые в диффузионных насосах масла и некоторые органические жидкости (силиконы и др.) состоят из нескольких фракций, имеющих различную температуру возгонки и упругости насыщенных паров. Легкие фракции масел, возгоняемые при более низких температурах, направляются в нижнее сопло 3. Эти пары вырываются из сопла с большой скоростью и увлекают молекулы воздуха в нижнюю часть сосуда диффузионного насоса. При этом откачка газа происходит благодаря двум эффектам: струя пара увлекает молекулы воздуха за счет снижения статического давления вблизи струи, а также за счет диффузии молекул воздуха в область, где находится струя пара. Хотя давление в самой струе и велико, но частное давление воздуха мало и именно оно определяет диффузию воздуха в струю. Более тяжелые фракции масел направляются в верхнее сопло 4. Ввиду меньшей упругости насыщенных паров они могут производить откачку до более высокого вакуума.

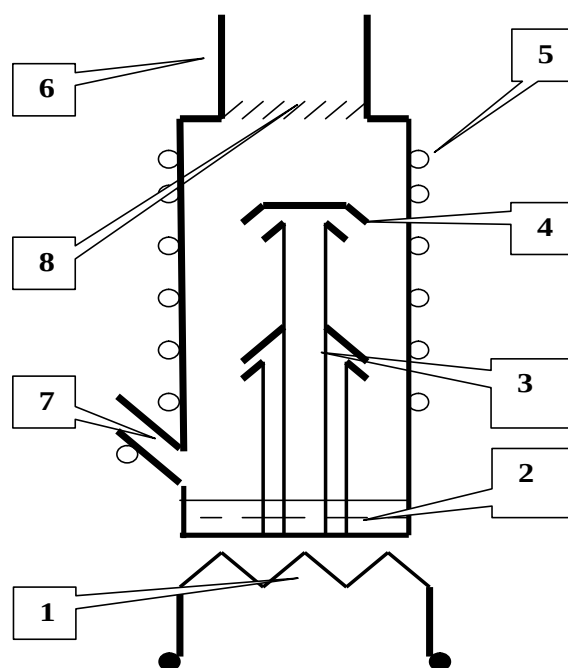


Рис. 2. Схема паромасляного диффузионного насоса: 1 – электрический нагреватель; 2 – вакуумное масло; 3 – нижнее сопло; 4 – верхнее сопло; 5 – трубки водяного охлаждения; 6 – патрубок для соединения с высоковакуумным клапаном; 7 – выпускной патрубок; 8 – маслоотражающие пластины

Выходящие пары масел попадают на стенки насоса, которые охлаждаются проточной водой и конденсируются на этих стенках. Образовавшаяся жидкость стекает по стенкам на дно диффузионного насоса в резервуар 2. При этом откачиваемый воздух через выпускной патрубок 7 удаляется форвакуумным насосом. В верхней части насоса устанавливаются маслоотражающие пластины 8, не допускающие попадание паров масла в откачиваемое пространство. Для этой же цели в диффузионных насосах применяются азотные ловушки, позволяющие повышать вакуум почти на порядок. При выполнении данной лабораторной работы необходимо обратить внимание на конструкцию и принцип работы маслоотражающих пластин и конструкцию азотной ловушки.

Для получения более высокого вакуума применяют сорбционные и другие типы насосов.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Диффузионный паромасляный насос.
2. Маслоотражающее устройство с водяным охлаждением.
3. Устройство с маслоотражающими пластинами.
4. Азотная ловушка.
5. Высоковакуумный клапан.
6. Защитная сетка.

5. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема вакуумного поста для получения высокого вакуума представлена на рис. 3.

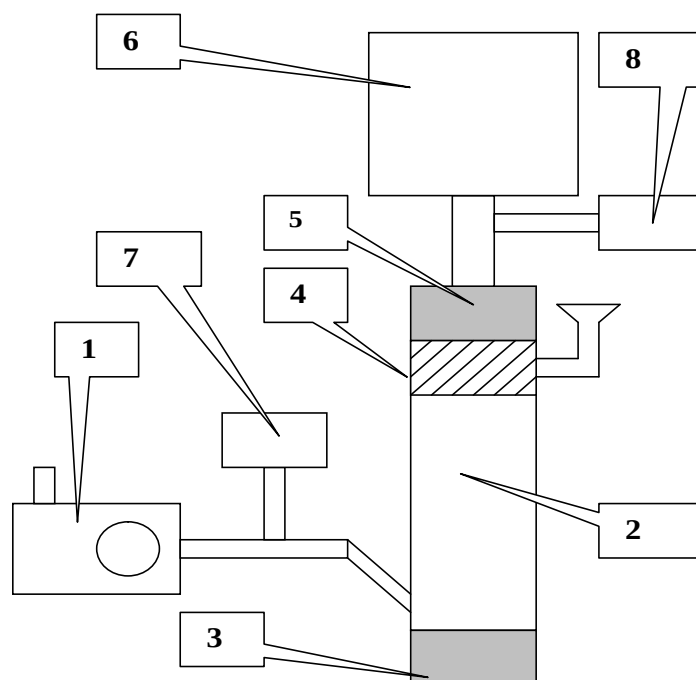


Рис. 3. Блок-схема вакуумного поста: 1 – форвакуумный роторный насос; 2 – диффузионный паромасляный насос; 3 – электрическая печь диффузионного насоса мощностью 400-600 Вт; 4 – азотная ловушка; 5 – высоковакуумный клапан; 6 – откачиваемый объем; 7 – манометр предварительного разрежения; 8 – манометр высокого вакуума

Насос предварительного разрежения 1 (форвакуумный насос) соединяют с выходом пароструйного диффузионного насоса 2, откачивающего воздух из сосуда 6. Непосредственное подключение диффузионного пароструйного насоса 2 к откачиваемому объему 6 проводится с помощью высоковакуумного клапана 5. Манометры 7 и 8 используются для контроля вакуума в системе предварительного и высокого вакуума. Азотная ловушка 4 позволяет уменьшить давление в системе высокого вакуума примерно на порядок.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовьте макет вакуумного поста к работе.
2. Разберите на отдельные детали паромасляный диффузионный насос (рис. 4). Зарисуйте в рабочей тетради конструкцию верхнего и нижнего сопла, а также схему выпускного патрубка (рис. 5, 6).
3. Соберите паромасляный насос и установите его в исходное рабочее положение.
4. Зарисуйте в тетради конструкции маслоотражающего устройства с водяным охлаждением (рис. 7), а также устройство с маслоотражающими пластинами (рис. 8, 9).
5. Зарисуйте в тетради конструкцию азотной ловушки (рис. 10, 11, 12).

6. Изобразите в рабочей тетради схему высоковакуумного клапана и схему защитной сетки (рис. 13, 14).
7. Установите в рабочее положение маслоотражающее устройство, маслоотражающие пластины, азотную ловушку, высоковакуумный клапан, защитную сетку.
8. Восстановите детали высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса в исходное состояние на макете вакуумного поста (рис. 15).

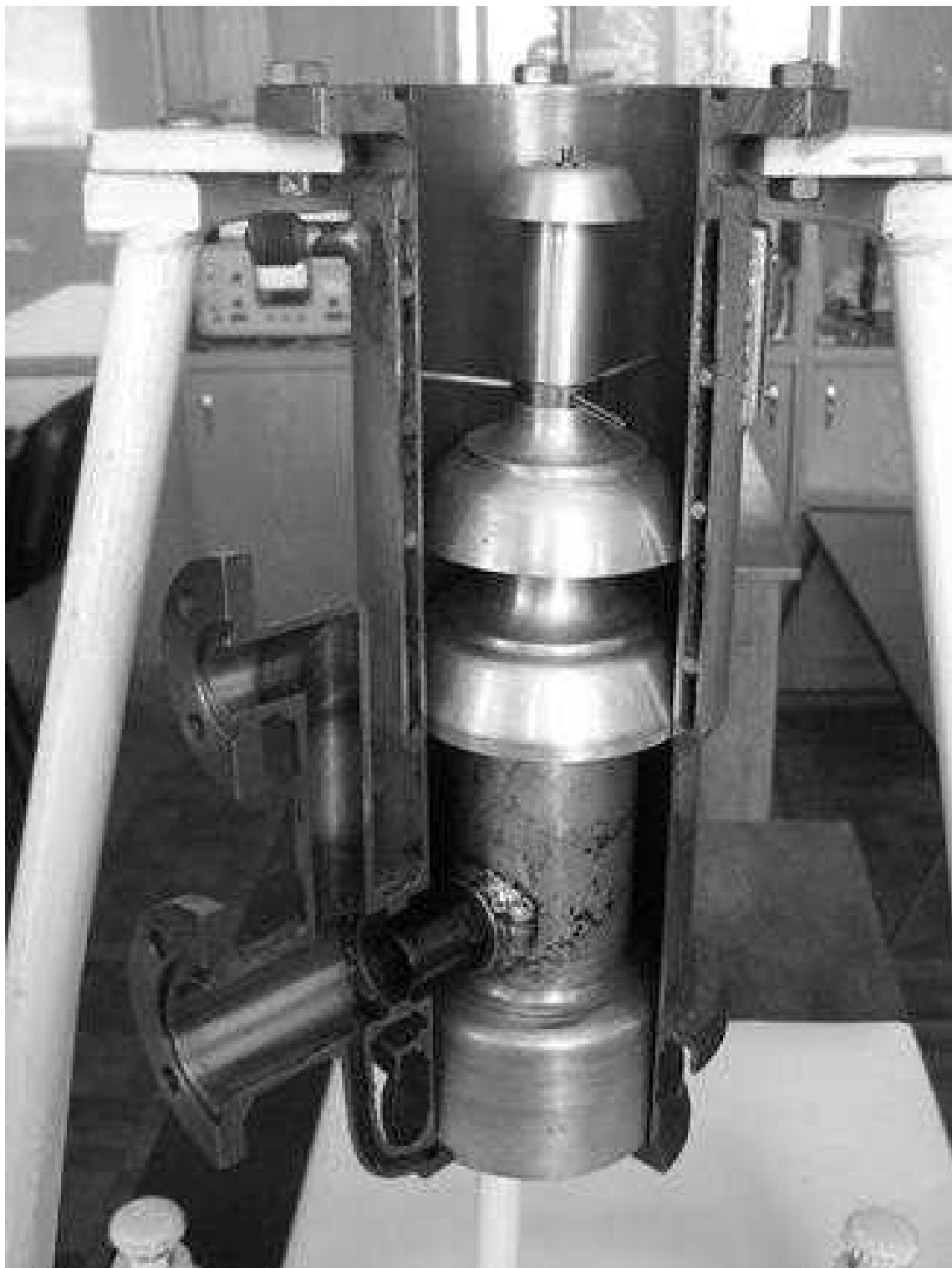


Рис. 4. Разрез диффузионного паромасляного насоса



Рис. 5. Верхнее сопло диффузионного насоса



Рис. 6. Нижнее сопло диффузионного насоса



Рис. 7. Маслоотражающая пластина с водяным охлаждением



Рис. 8. Маслоотражающие пластины (вид сверху)



Рис. 9. Маслоотражающие пластины (вид сбоку)



Рис. 10. Азотная ловушка



Рис. 11. Азотная ловушка (вид сбоку)



Рис. 12. Азотная ловушка

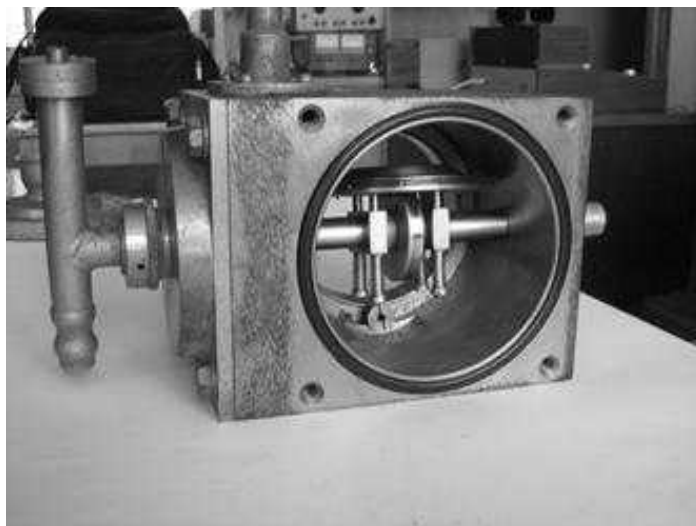


Рис. 13. Высоковакуумный клапан

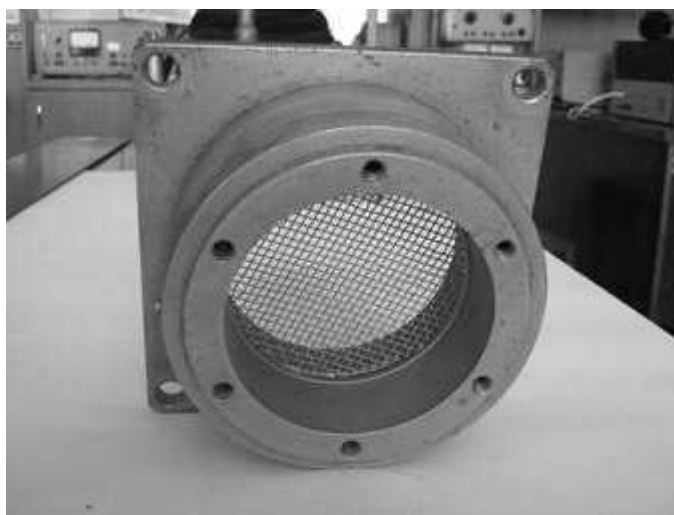


Рис. 14. Защитная сетка



Рис. 15. Детали вакуумного поста в разобранном виде на стенде вакуумного поста

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип работы форвакуумного насоса. Укажите физические характеристики получаемого предельного вакуума.
2. Объясните устройство и принцип работы диффузионного паромасляного насоса. Укажите физические характеристики получаемого предельного вакуума.
3. Поясните назначение азотной ловушки, высоковакуумного клапана, маслоотражающих пластин.
4. Поясните устройство и принцип работы термпарного и ионизационного манометров для измерения вакуума.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

1. Число значащих цифр при вычислении погрешностей

“Значащими цифрами числа называют все его цифры, кроме нулей, стоящих левее первой, отличной от нуля, цифры, и нулей, стоящих в конце числа, если они стоят взамен неизвестных или отброшенных цифр” (Определение Б.М. Брадиса).

Можно сформулировать иначе: “Значащими цифрами называют все цифры, кроме левых нулей”.

Заметим, что нуль, стоящий в конце десятичной дроби, - всегда значащая цифра (иначе бы этот нуль просто не писали).

Рассмотрим целое приближенное число с нулями справа. Эти нули могут быть значащими или незначащими. Незначащие нули в конце целого приближенного числа можно отмечать каким-либо знаком, например, чертой или другими обозначениями. Лучше вообще не записывать незначащих нулей. Для этого существует два способа:

1. Переход к кратным единицам.

2. Запись результата вычислений или измерений в нормализованной форме (при этом незначащие нули не пишутся).

Если абсолютная погрешность приближенного числа не превышает половины единицы последнего разряда, то все цифры приближенного числа называют верными. Если в приближенном числе все значащие цифры, кроме последней, являются верными, но абсолютная погрешность числа превышает половину единицы последнего разряда, то цифра этого разряда называется сомнительной.

Правило записи приближенного числа (принцип А.Н. Крылова): “Писать число необходимо так, чтобы в нем все значащие цифры, кроме последней, были верны и лишь последняя цифра была бы сомнительной и при этом не более как на одну единицу”.

По принципу Брадиса – Крылова сомнительную цифру сохраняют и в том случае, когда погрешность числа превосходит единицу последнего разряда, но при этом малые значения погрешности более вероятны, чем большие.

Все цифры приближенного числа, следующие за верными и одной сомнительной цифрой, называют неверными.

По принципу Крылова – Брадиса неверные цифры не пишутся.

Число значащих цифр абсолютной погрешности определяется величиной относительной погрешности средней квадратичной ошибки, соизмеримой с абсолютной погрешностью, по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}} = \frac{100\%}{\sqrt{2(N-1)}}, \quad (1)$$

где ε – относительная погрешность определения средней квадратичной ошибки, примерно равной величине абсолютной погрешности; N – число измерений.

Например: при $N = 25$, $e = \frac{1}{7} \cong 15\%$, т.е. относительная погрешность определения квадратичной ошибки (абсолютной погрешности) вычисляется с точностью примерно равной 15 %. Таким образом, если в абсолютной погрешности первая значащая цифра равна или больше 7, то в окончательном результате следует записывать одну значащую цифру, а если меньше 7 – то две значащие цифры.

Так, если $\Delta A = 0,7512$, то в окончательной форме приводим одну значащую цифру, т.е. $\Delta A = 0,8$ (с учетом округления погрешности с избытком). Если для этого случая ($e = \frac{1}{7} \cong 15\%$), $\Delta A = 0,3671$, то в окончательном виде приводим уже две значащие цифры, т.е. $\Delta A = 0,37$ (также с учетом округления с избытком).

При $N = 9$ погрешность определения абсолютной ошибки, вычисляемая по формуле (1) $e = \frac{1}{4} \cong 25\%$. Следовательно, в окончательной форме необходимо привести одну значащую цифру, если первая значащая цифра абсолютной погрешности равна или больше 4 и две значащие цифры, если первая значащая цифра меньше 4.

Например, если $\Delta A = 0,523$, то абсолютную погрешность записываем с точностью до одной цифры $\Delta A = 0,6$. Если $\Delta A = 0,124$, то в окончательной записи следует привести две значащие цифры, т.е. $\Delta A = 0,13$.

Практически при числе измерений $N \leq 15$ погрешность округляют до одной значащей цифры, если она больше или равна двум и сохраняют две значащие цифры в остальных случаях. Как видно, такие рекомендации не совсем точны и носят рекомендательный характер. В любом случае видно, что абсолютная погрешность записывается с точностью до одной или двух значащих цифр.

2. Запись погрешностей и результатов измерений

При окончательной записи результатов и погрешностей измерений мы рекомендуем следующие правила:

1. Абсолютную и относительную погрешность необходимо записывать с точностью до двух значащих цифр.

2. Число значащих цифр при записи среднеарифметического результата измерений определяется разрядом числа абсолютной погрешности его измерения, т.е. при записи среднего значения измеряемой величины $\langle A \rangle$ необходимо указать все цифры вплоть до последнего десятичного разряда, используемого для записи погрешности.

3. Если абсолютная погрешность составляет единицы последней значащей цифры окончательного результата, то последняя цифра в этом результате является сомнительной, но и её надо записывать. Если же погрешность составляет две значащие цифры, то в этом значении последнюю цифру следует округлить.

Следует, однако, иметь в виду, что правило №3 часто не выполняют.

Ниже, приведены примеры окончательной записи результатов измерений.

Таблица 1

Неправильная запись	Правильная запись
13,83721±0,013	13,84 ± 0,013
353,12±38	350 ± 38
2742,32±14,65	2740 ± 15

Чтобы избежать неопределенности с нулями в конце числа, рекомендуется окончательный результат записывать в нормализованной форме.

Например, $12856=1,2856 \cdot 10^4$; $0,00865=8,65 \cdot 10^{-3}$.

Поэтому, в третьем столбце, во второй и третьей строках, более корректно результат представить в нормальной форме записи $(3,5 \pm 0,38) \cdot 10^2$ и $(2,74 \pm 0,015) \cdot 10^3$ (незначащие нули не пишут).

При вычислении результатов по имеющимся измерениям возникает вопрос, сколько знаков нужно сохранять во всех промежуточных расчетах. Практика показывает, что во всех промежуточных расчетах при небольшом числе наблюдений на каждой стадии вычисления число значащих цифр должно быть больше на одну или на две, чем их количество в окончательном ответе. В этом случае есть уверенность, что самими вычислениями не вносятся заметных ошибок. Если же после вычисления ошибок окажется, что среднее значение измеряемой величины имеет недостаточное число знаков, то все вычисления среднего и его ошибки следует повторить.

ТЕСТ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОСТИ ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Вопросы	Ответы
Вопрос 1. Табличное значение плотности золота равно $19,3 \text{ г/см}^3$. Найдите абсолютную погрешность плотности.	А. $0,050 \text{ г/см}^3$ Б. $0,10 \text{ г/см}^3$ В. $0,15 \text{ г/см}^3$ Г. $0,20 \text{ г/см}^3$
Вопрос 2. Ускорение силы тяжести равно $9,81 \text{ м/с}^2$. Найдите абсолютную погрешность ускорения.	А. 0.050 м/с^2 Б. $0,010 \text{ м/с}^2$ В. $0,0050 \text{ м/с}^2$ Г. $0,10 \text{ м/с}^2$
Вопрос 3. Плотность воды равна $1,00 \text{ г/см}^3$. Сколько значащих цифр в этом числе?	А. 1 Б. 2 В. 3 Г. 0
Вопрос 4. Плотность ртути равна $13,60 \text{ г/см}^3$. Сколько значащих цифр в этом числе?	А. 1 Б. 2 В. 3 Г. 4
Вопрос 5. Плотность молока равна $1,030 \text{ г/см}^3$. Сколько значащих цифр в этом числе?	А. 1 Б. 2 В. 3 Г. 4
Вопрос 6. Запишите в нормальной форме следующее приближенное число $0,001250$.	А. $1,25 \cdot 10^{-3}$ Б. $1,250 \cdot 10^{-3}$ В. $12,5 \cdot 10^{-4}$ Г. $125 \cdot 10^{-5}$
Вопрос 7. Показатель преломления бензина $1,5014 (\pm 0,0001)$. Сколько в этом числе верных цифр?	А. 1 Б. 2 В. 3 Г. 4
Вопрос 8. Показатель преломления бензина $1,5014 (\pm 0,0001)$. Сколько в этом числе сомнительных цифр?	А. 1 Б. 2 В. 3 Г. 4
Вопрос 9. Число Фарадея равно $9,650 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$ имеет абсолютную погрешность $\pm 0,50 \cdot 10^2$. Сколько в этом числе верных цифр?	А. 1 Б. 2 В. 3 Г. 4
Вопрос 10. При рентгеноструктурных исследованиях были рассчитаны период решетки железа и его абсолютная погрешность $(2,8625036 \pm 0,0017208) \text{ \AA}$. Запишите в ответе грамотно полученный результат $(a \pm \Delta a) \text{ \AA}$.	А. $2,863 \pm 0,001 \text{ \AA}$ Б. $2,863 \pm 0.0018 \text{ \AA}$ В. $2,863 \pm 0,002 \text{ \AA}$ Г. $2,8625 \pm 0,00172 \text{ \AA}$

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная Авогадро $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Постоянная Больцмана $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Универсальная газовая постоянная $R = 8,31441$ Дж/(моль·К).

Элементарный электрический заряд $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с.

Постоянная Планка $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с;

$\hbar = 1,0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $6,59 \cdot 10^{-16}$ эВ·с.

Масса покоя электрона $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.

Энергия покоя электрона $E_{0e} = 0,511$ МэВ.

Масса покоя протона $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,0072776470$ а.е.м.

Энергия покоя протона $E_{0p} = 938,26$ МэВ.

Масса покоя нейтрона $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,008665012$ а.е.м.

Энергия покоя нейтрона $E_{0n} = 939,55$ МэВ.

Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Постоянная Фарадея $F = N_A \cdot e = 9,648456 \cdot 10^4$ Кл/моль.

Постоянная Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Постоянная Вина $b = 0,00289782$ м·К.

Постоянная Ридберга $R_\infty = 10973731,77$ м⁻¹.

Радиус первой боровской орбиты $a_0 = 0,529117706 \cdot 10^{-10}$ м.

Комптоновская длина волны электрона $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м.

Магнетон Бора $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл.

Энергия ионизации атома водорода $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева

I		II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H водород 1,0078						(H)	2 He гелий 4,00260
3	Li литий 6,94	4 Be бериллий 9,012	5 B бор 10,81	6 C углерод 12,011	7 N азот 14,0067	8 O кислород 15,999	9 F фтор 18,998403	10 Ne неон 20,17
11	Na натрий 22,98977	12 Mg магний 24,305	13 Al алюминий 26,98154	14 Si кремний 28,086	15 P фосфор 30,97376	16 S сера 32,06	17 Cl хлор 35,453	18 Ar аргон 39,94
19	K калий 39,098	20 Ca кальций 40,08	21 Sc скандий 44,9558	22 Ti титан 47,88	23 V ванадий 50,9415	24 Cr хром 51,996	25 Mn марганец 54,9380	26 Fe железо 55,845
27	Cu медь 63,54	28 Ni никель 58,69	29 Co кобальт 58,9332	30 Zn цинк 65,38	31 Ga галлий 69,72	32 Ge германий 72,6	33 As мышьяк 74,9216	34 Se селен 78,96
35	Rb рубидий 85,468	36 Sr стронций 87,62	37 Y иттрий 88,9058	38 Zr цирконий 91,22	39 Nb ниобий 92,9064	40 Mo молибден 95,94	41 Tc технеций 98,9062	42 Ru рутений 101,07
43	Ag серебро 107,868	44 Cd кадмий 112,41	45 In индий 114,82	46 Sn олово 118,7	47 Sb сурьма 121,7	48 Te теллур 127,6	49 I йод 126,9045	50 Xe ксенон 131,29
53	Cs цезий 132,9054	54 Ba барий 137,33	55 La лантан 138,905	56 Hf гафний 178,4	57 Ta тантал 180,947	58 W вольфрам 183,84	59 Re рений 186,207	60 Pt платина 195,08
71	Au золото 196,9665	72 Hg ртуть 200,59	73 Tl таллий 204,38	74 Pb свинец 207,2	75 Bi висмут 208,980	76 Po полоний [209]	77 At астат [210]	78 Rn радон [222]
87	Fr франций [223]	88 Ra радий 226,0254	89 Ac актиний [227]	90 Th торий 232,0377	91 Pa протактиний [231]	92 U уран 238,0289	93 Np нептуний [237]	94 Pu плутоний [244]
95	Pr примидий 140,9077	96 Nd неодим 144,24	97 Pm прометий [145]	98 Sm самарий 150,4	99 Eu европий 151,96	100 Gd гадолиний 157,25	101 Tb тербий 158,92534	102 Dy диспрозий 162,5
101	Ce церий 140,12	102 Pr примидий 140,9077	103 Nd неодим 144,24	104 Pm прометий [145]	105 Sm самарий 150,4	106 Eu европий 151,96	107 Gd гадолиний 157,25	108 Tb тербий 158,92534
109	Th торий 232,0377	110 Pa протактиний [231]	111 U уран 238,0289	112 Np нептуний [237]	113 Pu плутоний [244]	114 Am амерций [243]	115 Cm курий [247]	116 Bk берклий [247]
121	Ac актиний [227]	122 Th торий 232,0377	123 Pa протактиний [231]	124 U уран 238,0289	125 Np нептуний [237]	126 Pu плутоний [244]	127 Am амерций [243]	128 Cm курий [247]
133	Fr франций [223]	134 Ra радий 226,0254	135 Ac актиний [227]	136 Th торий 232,0377	137 Pa протактиний [231]	138 U уран 238,0289	139 Np нептуний [237]	140 Pu плутоний [244]
145	Pr примидий 140,9077	146 Nd неодим 144,24	147 Pm прометий [145]	148 Sm самарий 150,4	149 Eu европий 151,96	150 Gd гадолиний 157,25	151 Tb тербий 158,92534	152 Dy диспрозий 162,5
157	Ce церий 140,12	158 Pr примидий 140,9077	159 Nd неодим 144,24	160 Pm прометий [145]	161 Sm самарий 150,4	162 Eu европий 151,96	163 Gd гадолиний 157,25	164 Tb тербий 158,92534
169	Th торий 232,0377	170 Pa протактиний [231]	171 U уран 238,0289	172 Np нептуний [237]	173 Pu плутоний [244]	174 Am амерций [243]	175 Cm курий [247]	176 Bk берклий [247]
181	Ac актиний [227]	182 Th торий 232,0377	183 Pa протактиний [231]	184 U уран 238,0289	185 Np нептуний [237]	186 Pu плутоний [244]	187 Am амерций [243]	188 Cm курий [247]
193	Fr франций [223]	194 Ra радий 226,0254	195 Ac актиний [227]	196 Th торий 232,0377	197 Pa протактиний [231]	198 U уран 238,0289	199 Np нептуний [237]	200 Pu плутоний [244]
205	Pr примидий 140,9077	206 Nd неодим 144,24	207 Pm прометий [145]	208 Sm самарий 150,4	209 Eu европий 151,96	210 Gd гадолиний 157,25	211 Tb тербий 158,92534	212 Dy диспрозий 162,5
217	Ce церий 140,12	218 Pr примидий 140,9077	219 Nd неодим 144,24	220 Pm прометий [145]	221 Sm самарий 150,4	222 Eu европий 151,96	223 Gd гадолиний 157,25	224 Tb тербий 158,92534
229	Th торий 232,0377	230 Pa протактиний [231]	231 U уран 238,0289	232 Np нептуний [237]	233 Pu плутоний [244]	234 Am амерций [243]	235 Cm курий [247]	236 Bk берклий [247]
241	Ac актиний [227]	242 Th торий 232,0377	243 Pa протактиний [231]	244 U уран 238,0289	245 Np нептуний [237]	246 Pu плутоний [244]	247 Am амерций [243]	248 Cm курий [247]
253	Fr франций [223]	254 Ra радий 226,0254	255 Ac актиний [227]	256 Th торий 232,0377	257 Pa протактиний [231]	258 U уран 238,0289	259 Np нептуний [237]	260 Pu плутоний [244]
265	Pr примидий 140,9077	266 Nd неодим 144,24	267 Pm прометий [145]	268 Sm самарий 150,4	269 Eu европий 151,96	270 Gd гадолиний 157,25	271 Tb тербий 158,92534	272 Dy диспрозий 162,5
277	Ce церий 140,12	278 Pr примидий 140,9077	279 Nd неодим 144,24	280 Pm прометий [145]	281 Sm самарий 150,4	282 Eu европий 151,96	283 Gd гадолиний 157,25	284 Tb тербий 158,92534
289	Th торий 232,0377	290 Pa протактиний [231]	291 U уран 238,0289	292 Np нептуний [237]	293 Pu плутоний [244]	294 Am амерций [243]	295 Cm курий [247]	296 Bk берклий [247]
301	Ac актиний [227]	302 Th торий 232,0377	303 Pa протактиний [231]	304 U уран 238,0289	305 Np нептуний [237]	306 Pu плутоний [244]	307 Am амерций [243]	308 Cm курий [247]
313	Fr франций [223]	314 Ra радий 226,0254	315 Ac актиний [227]	316 Th торий 232,0377	317 Pa протактиний [231]	318 U уран 238,0289	319 Np нептуний [237]	320 Pu плутоний [244]
325	Pr примидий 140,9077	326 Nd неодим 144,24	327 Pm прометий [145]	328 Sm самарий 150,4	329 Eu европий 151,96	330 Gd гадолиний 157,25	331 Tb тербий 158,92534	332 Dy диспрозий 162,5
337	Ce церий 140,12	338 Pr примидий 140,9077	339 Nd неодим 144,24	340 Pm прометий [145]	341 Sm самарий 150,4	342 Eu европий 151,96	343 Gd гадолиний 157,25	344 Tb тербий 158,92534
349	Th торий 232,0377	350 Pa протактиний [231]	351 U уран 238,0289	352 Np нептуний [237]	353 Pu плутоний [244]	354 Am амерций [243]	355 Cm курий [247]	356 Bk берклий [247]
361	Ac актиний [227]	362 Th торий 232,0377	363 Pa протактиний [231]	364 U уран 238,0289	365 Np нептуний [237]	366 Pu плутоний [244]	367 Am амерций [243]	368 Cm курий [247]
373	Fr франций [223]	374 Ra радий 226,0254	375 Ac актиний [227]	376 Th торий 232,0377	377 Pa протактиний [231]	378 U уран 238,0289	379 Np нептуний [237]	380 Pu плутоний [244]
385	Pr примидий 140,9077	386 Nd неодим 144,24	387 Pm прометий [145]	388 Sm самарий 150,4	389 Eu европий 151,96	390 Gd гадолиний 157,25	391 Tb тербий 158,92534	392 Dy диспрозий 162,5
397	Ce церий 140,12	398 Pr примидий 140,9077	399 Nd неодим 144,24	400 Pm прометий [145]	401 Sm самарий 150,4	402 Eu европий 151,96	403 Gd гадолиний 157,25	404 Tb тербий 158,92534
409	Th торий 232,0377	410 Pa протактиний [231]	411 U уран 238,0289	412 Np нептуний [237]	413 Pu плутоний [244]	414 Am амерций [243]	415 Cm курий [247]	416 Bk берклий [247]
421	Ac актиний [227]	422 Th торий 232,0377	423 Pa протактиний [231]	424 U уран 238,0289	425 Np нептуний [237]	426 Pu плутоний [244]	427 Am амерций [243]	428 Cm курий [247]
433	Fr франций [223]	434 Ra радий 226,0254	435 Ac актиний [227]	436 Th торий 232,0377	437 Pa протактиний [231]	438 U уран 238,0289	439 Np нептуний [237]	440 Pu плутоний [244]
445	Pr примидий 140,9077	446 Nd неодим 144,24	447 Pm прометий [145]	448 Sm самарий 150,4	449 Eu европий 151,96	450 Gd гадолиний 157,25	451 Tb тербий 158,92534	452 Dy диспрозий 162,5
457	Ce церий 140,12	458 Pr примидий 140,9077	459 Nd неодим 144,24	460 Pm прометий [145]	461 Sm самарий 150,4	462 Eu европий 151,96	463 Gd гадолиний 157,25	464 Tb тербий 158,92534
469	Th торий 232,0377	470 Pa протактиний [231]	471 U уран 238,0289	472 Np нептуний [237]	473 Pu плутоний [244]	474 Am амерций [243]	475 Cm курий [247]	476 Bk берклий [247]
481	Ac актиний [227]	482 Th торий 232,0377	483 Pa протактиний [231]	484 U уран 238,0289	485 Np нептуний [237]	486 Pu плутоний [244]	487 Am амерций [243]	488 Cm курий [247]
493	Fr франций [223]	494 Ra радий 226,0254	495 Ac актиний [227]	496 Th торий 232,0377	497 Pa протактиний [231]	498 U уран 238,0289	499 Np нептуний [237]	500 Pu плутоний [244]
505	Pr примидий 140,9077	506 Nd неодим 144,24	507 Pm прометий [145]	508 Sm самарий 150,4	509 Eu европий 151,96	510 Gd гадолиний 157,25	511 Tb тербий 158,92534	512 Dy диспрозий 162,5
517	Ce церий 140,12	518 Pr примидий 140,9077	519 Nd неодим 144,24	520 Pm прометий [145]	521 Sm самарий 150,4	522 Eu европий 151,96	523 Gd гадолиний 157,25	524 Tb тербий 158,92534
529	Th торий 232,0377	530 Pa протактиний [231]	531 U уран 238,0289	532 Np нептуний [237]	533 Pu плутоний [244]	534 Am амерций [243]	535 Cm курий [247]	536 Bk берклий [247]
541	Ac актиний [227]	542 Th торий 232,0377	543 Pa протактиний [231]	544 U уран 238,0289	545 Np нептуний [237]	546 Pu плутоний [244]	547 Am амерций [243]	548 Cm курий [247]
553	Fr франций [223]	554 Ra радий 226,0254	555 Ac актиний [227]	556 Th торий 232,0377	557 Pa протактиний [231]	558 U уран 238,0289	559 Np нептуний [237]	560 Pu плутоний [244]
565	Pr примидий 140,9077	566 Nd неодим 144,24	567 Pm прометий [145]	568 Sm самарий 150,4	569 Eu европий 151,96	570 Gd гадолиний 157,25	571 Tb тербий 158,92534	572 Dy диспрозий 162,5
577	Ce церий 140,12	578 Pr примидий 140,9077	579 Nd неодим 144,24	580 Pm прометий [145]	581 Sm самарий 150,4	582 Eu европий 151,96	583 Gd гадолиний 157,25	584 Tb тербий 158,92534
589	Th торий 232,0377	590 Pa протактиний [231]	591 U уран 238,0289	592 Np нептуний [237]	593 Pu плутоний [244]	594 Am амерций [243]	595 Cm курий [247]	596 Bk берклий [247]
601	Ac актиний [227]	602 Th торий 232,0377	603 Pa протактиний [231]	604 U уран 238,0289	605 Np нептуний [237]	606 Pu плутоний [244]	607 Am амерций [243]	608 Cm курий [247]
613	Fr франций [223]	614 Ra радий 226,0254	615 Ac актиний [227]	616 Th торий 232,0377	617 Pa протактиний [231]	618 U уран 238,0289	619 Np нептуний [237]	620 Pu плутоний [244]
625	Pr примидий 140,9077	626 Nd неодим 144,24	627 Pm прометий [145]	628 Sm самарий 150,4	629 Eu европий 151,96	630 Gd гадолиний 157,25	631 Tb тербий 158,92534	632 Dy диспрозий 162,5
637	Ce церий 140,12	638 Pr примидий 140,9077	639 Nd неодим 144,24	640 Pm прометий [145]	641 Sm самарий 150,4	642 Eu европий 151,96	643 Gd гадолиний 157,25	644 Tb тербий 158,92534
649	Th торий 232,0377	650 Pa протактиний [231]	651 U уран 238,0289	652 Np нептуний [237]	653 Pu плутоний [244]	654 Am амерций [243]	655 Cm курий [247]	656 Bk берклий [247]
661	Ac актиний [227]	662 Th торий 232,0377	663 Pa протактиний [231]	664 U уран 238,0289	665 Np нептуний [237]	666 Pu плутоний [244]	667 Am амерций [243]	668 Cm курий [247]
673	Fr франций [223]	674 Ra радий 226,0254	675 Ac актиний [227]	676 Th торий 232,0377	677 Pa протактиний [231]	678 U уран 238,0289	679 Np нептуний [237]	680 Pu плутоний [244]
685	Pr примидий 140,9077	686 Nd неодим 144,24	687 Pm прометий [145]	688 Sm самарий 150,4	689 Eu европий 151,96	690 Gd гадолиний 157,25	691 Tb тербий 158,92534	692 Dy диспрозий 162,5
697	Ce церий 140,12	698 Pr примидий 140,9077	699 Nd неодим 144,24	700 Pm прометий [145]	701 Sm самарий 150,4	702 Eu европий 151,96	703 Gd гадолиний 157,25	704 Tb тербий 158,92534
709	Th торий 232,0377	710 Pa протактиний [231]	711 U уран 238,0289	712 Np нептуний [237]	713 Pu плутоний [244]	714 Am амерций [243]	715 Cm курий [247]	716 Bk берклий [247]
721	Ac актиний [227]	722 Th торий 232,0377	723 Pa протактиний [231]	724 U уран 238,0289	725 Np нептуний [237]	726 Pu плутоний [244]	727 Am амерций [243]	728 Cm курий [247]
733	Fr франций [223]	734 Ra радий 226,0254	735 Ac актиний [227]	736 Th торий 232,0377	737 Pa протактиний [231]	738 U уран 238,0289	739 Np нептуний [237]	740 Pu плутоний [244]
745	Pr примидий 140,9077	746 Nd неодим 144,24	747 Pm прометий [145]	748 Sm самарий 150,4	749 Eu европий 151,96	750 Gd гадолиний 157,25	751 Tb тербий 158,92534	752 Dy диспрозий 1

ПРИЛОЖЕНИЕ В
КОЭФФИЦИЕНТЫ СТЬЮДЕНТА

<i>n</i>	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,7	31,8	63,7	636,6
3	2,92	4,30	6,96	9,92	31,6
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,9
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,36	4,03	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,89	2,36	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,05	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,14	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
21	1,72	2,09	2,53	2,85	3,85
22	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
23	1,72	2,07	2,51	2,82	3,79
24	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
25	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75
26	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
27	1,71	2,06	2,48	2,78	3,71
28	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
29	1,70	2,05	2,47	2,76	3,67
31	1,70	2,05	2,46	2,76	3,66
33	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
35	1,69	2,04	2,45	2,74	3,62
37	1,69	2,03	2,44	2,73	3,60
39	1,69	2,03	2,43	2,72	3,58
41	1,69	2,02	2,43	2,71	3,57
43	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
45	1,68	2,02	2,42	2,70	3,54