ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 1759408E48E0BF16874B2A088ED99D3E
Владелец: Евсюкова Наталья Юрьевна
Действителен: с 03.03.2022 до 27.05.2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»**
ВОЛЖСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра гуманитарных и естественнонаучных дисциплин

# Методические указания к лабораторным работам по дисциплине ФИЗИКА

Направление подготовки

***09.03.01 Информатика и вычислительная техника***

Направленность (профиль, специализация) образовательной программы

***«Автоматизированные системы обработки информации и управления»***

Квалификация

бакалавр

Чебоксары

2019

УДК 004.415.2
ББК 32.973.26-02
К862

*Рецензенты:*

**М.В. Максимова**, кандидат физико-математических наук доцент кафедры математики и информатики Волжского филиала Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

**О.Н. Зайцев**, кандидат технических наук профессор кафедры «Управление в технических система и программирование»» Чебоксарского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

К 862 Григорьев Ю.И., Лаврентьева Т.Н. Лабораторный практикум по дисциплине «Физика». – Чебоксары: Волжский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2019. –67 с.

Методическое пособие составлено в соответствии с действующей программой курса «Физика» для студентов направления подготовки бакалавра 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Предназначено для студентов очной формы обучения. В нем кратко изложены необходимые теоретические сведения и методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика».

*Печатается по решению Учебно-методического совета Волжского филиала МАДИ*

© Григорьев Ю.И., Лаврентьева Т.Н. 2019
© Волжский филиал МАДИ, 2019

# Оглавление

Лабораторная работа №1.Обработка результатов физических измерений……... 4
Лабораторная работа №2. Движение с постоянным ускорением…… 10
Лабораторная работа №3. Изучение распределения Максвелла……. 14
Лабораторная работа №4. Адиабатический процесс…… 18
Лабораторная работа №5. Теорема Остроградского-Гаусса для электростатического поля в вакууме…… 22
Лабораторная работа №6. Закон Ома для неоднородного участка цепи…… 27
Лабораторная работа №7. Электромагнитная индукция…….. 31
Лабораторная работа №8. Механические колебания…… 35
Лабораторная работа №9. Свободные колебания в контуре…… 41
Лабораторная работа №10. Интерференционный опыт Юнга……. 45
Лабораторная работа №11.Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона…… 49
Лабораторная работа №12. Внешний фотоэффект……... 52
Лабораторная работа №13. Эффект Комптона…….. 56
Лабораторная работа №14. Определение периода кристаллической решётки методом дифракции электронов……..... 60
Лабораторная работа №15. Спектр излучения атомарного водорода……. 63

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1**

# ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.

***Цель работы:*** рассмотреть простейшие методы измерений линейных величин и получить навыки обработки прямых и косвенных измерений; ознакомиться с методом наименьших квадратов.

***Оборудование:*** штангенциркуль, микрометр, образцы для измерений.

***Краткая теория.***

Для определения длины и расстояний применяются самые разнообразные способы, выбор которых определяется необходимой степенью точности и условий эксперимента. Для непосредственного измерения длины широко применяется масштабная линейка с сантиметровыми и миллиметровыми делениями.

Ценой деления шкалы любого прибора называется разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Для масштабной линейки она составляет 1 мм. При измерении максимальная ошибка не превосходит половины цены деления шкалы, поэтому точность измерения масштабной линейки не превышает, таким образом, половины цены деления, т.е. 0,5 мм.

Если необходимо произвести измерения с большей точностью, пользуются приборами, снабженными нониусами (см. ниже), например, штангенциркулем. Точность приборов в этом случае составляет 0,1-0,01 основного деления. Для измерения малых размеров (толщины, радиуса проволоки и т.д.) применяются приборы, снабженные микрометрическим винтом. Так очень распространен микрометр, которым можно измерять с точностью 0,01-0,005 мм.

Метод линейного нониуса

Нониусом называется небольшая дополнительная шкала к обычному масштабу, позволяющая увеличивать точность в 10-20 раз. Линейным нониусом называется маленькая линейка с делениями, которая может скользить вдоль большой линейки также с делениями, называемой масштабом.

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

Именно это позволяет, пользуясь нониусом, производить отсчеты с точностью до 1/m части наименьшего деления масштаба. Пусть расстояние между соседними штрихами масштаба y, а между соседними штрихами нониуса x. Можно записать, что x = y - (y/m). Величина $\Delta x = y - x = y/m$ носит название точности нониуса. В любом положении нониуса относительно масштаба одно из делений первого совпадает с каким-либо делением второго. Отсчет по нониусу основан именно на способности глаза фиксировать это совпадение делений нониуса и масштаба.

Рассмотрим теперь процесс измерения при помощи линейного нониуса. Пусть L — измеряемый отрезок. Совместим с его началом нулевое деление основного масштаба. Пусть при этом конец его окажется между k и (k+1) делением этого масштаба. Тогда можно записать $L = ky + \Delta L$, где $\Delta L$ — неизвестная пока доля k-го деления масштаба.

Приложим теперь к концу отрезка L наш нониус так, чтобы нуль нониуса совпадал с концом этого отрезка. Так как деления нониуса не равны делениям масштаба, то обязательно найдется на нем такое деление n, которое будет ближе всего подходить к соответствующему (k+n) делению масштаба. Как видно из рис.1,

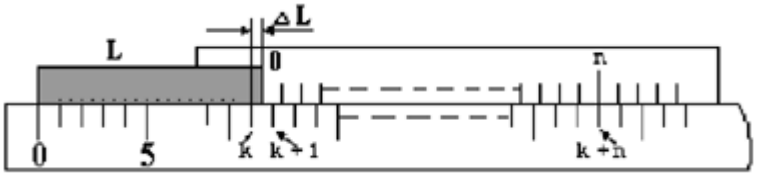



Рис.1 Схема нониуса

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

и вся длина будет равна

$$L = ky + n\Delta x \text{ или } L = ky + n\,(y/m),$$

что можно сформулировать так: длина отрезка, измеряемого при помощи нониуса, равна числу целых делений масштаба плюс точность нониуса, умноженная на номер деления нониуса, совпадающего с некоторыми делениями масштаба. Погрешность нониуса принимают равной его точности.

Штангенциркуль (рис.2) состоит из разделенного на миллиметры масштаба M, вдоль которого может перемещаться ножка FB с зажимным винтом C. В обойме сделан вырез против делений масштаба, на скошенном краю которого, прилегающем к масштабу, нанесен нониус. Цена деления обычно 0,1; 0,05; 0,02 мм.

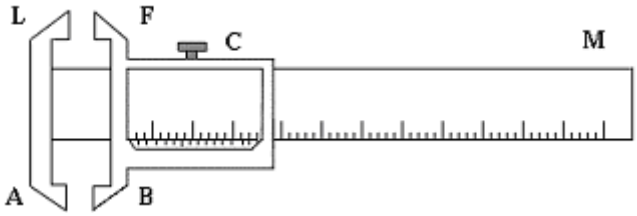



Рис.2. Схема штангенциркуля.

При нулевом показании нуль нониуса совпадает с нулем масштаба. Неподвижная ножка LA служит упором для измеряемого тела, части обеих ножек AB - для измерения внутренних размеров тела.

Метод микрометрического винта (микрометр)

При точных измерениях расстояний нередко применяются микрометрические винты — винты с малым и точно выверенным шагом.

Микрометр (рис.3) имеет вид тисков, в которых измеряемый объект зажимается с помощью винта. Шаг винта обыкновенно равен 1 или 0,5 мм. На стержне A укрепляется барабан с нанесенной на него шкалой, имеющей 50 или 25 делений. При зажатом винте нуль барабана стоит против нуля шкалы D.

Измеряемый предмет помещают между винтом и противоположным ему упором, затем, вращая винт за головку B, доводят его до соприкосновения с исследуемым предметом.

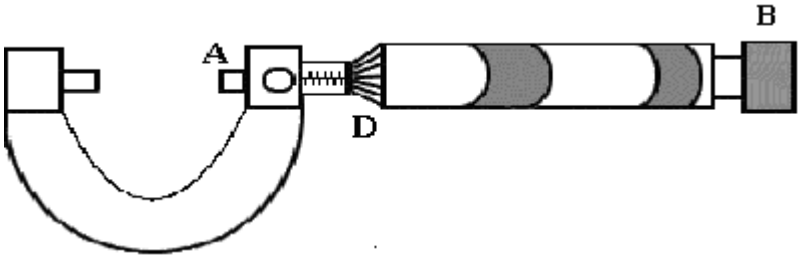



Рис.3. Схема микромет-

По линейной шкале отсчитываются миллиметры, а по шкале барабана — сотые доли миллиметра. Главным источником ошибок является неравномерность нажатия винта на измеряемый предмет.

Для устранения этого недостатка микрометры снабжаются специальным приспособлением, не допускающим сильного нажатия на исследуемый предмет (трещотки). Действие подобных приспособлений основано на проскальзывании, возникающем между стержнем винта А и рукояткой В, проворачивающей винт при усилии, большем порогового.

**Практическая часть (измерения)**

1. Измерьте штангенциркулем диаметр d цилиндра (систематическая ошибка измерения равна δ = 0.05 *мм* ). Результаты измерений занесите во вторую графу таблицы, найти и в третью графу этой таблицы записать разности *(d-* $\bar{x}$ *)*, а в четвертую – их квадраты *(таблица 1).*

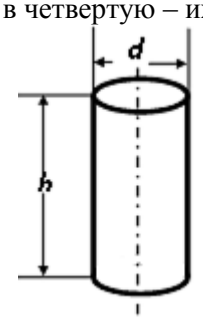



*Таблица 1*

| *n* | *d, мм* | *(d-* $\bar{x}$ *)* | *(d-* $\bar{x}$ *)²* |
|---|---|---|---|
| *1* | | | |
| *2* | | | |
| *3* | | | |
| *4* | | | |
| *5* | | | |
| *Σ* | | | |

$$\bar{x} = \frac{\sum d_i}{n} =$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{x})^2}{n(n-1)}} =$$

Задавшись надежностью P = 0,95, по таблице коэффициентов Стьюдента для пяти измерений находим t = 2,77. Абсолютная ошибка находится по формуле:

$\Delta d = S_{\bar{x}} \cdot t,$ $\qquad \Delta d =$

Сравните случайную и систематическую ошибки:

$$\frac{\Delta d}{\delta} =$$

Если $\frac{\Delta d}{\delta} \le 3$, то отбрасывать δ нельзя, так как величина погрешности результата измерения Δd сравнима с величиной погрешности прибора δ, и в качестве границы доверительного интервала следует взять

$\Delta d = \sqrt{(S_{\bar{x}} \cdot t)^2 + \delta^2}$ , $\Delta d =$

Окончательный результат запишите в виде

$d = ($ $\pm$ $)$ *мм* при P = 0.95.

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{\bar{x}} \cdot 100\% =$$

2. Измерьте штангенциркулем высоту h цилиндра (систематическая ошибка измерения равна δ = 0.05 *мм* ). Результаты измерений занесите во вторую графу таблицы, найдите $\bar{x}$ и в третью графу этой таблицы запишите разности $(h - \bar{x})$, а в четвертую – их квадраты *(таблица 3).*

**Таблица 3**

| *n* | *h, мм* | $(h - \bar{x})$ | $(h - \bar{x})^2$ |
|---|---|---|---|
| *1* | | | |
| *2* | | | |
| *3* | | | |
| *4* | | | |
| *5* | | | |
| *Σ* | | | |

$$\bar{x} = \frac{\sum h_i}{n} =$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (h - \bar{x})^2}{n(n-1)}} =$$

Задавшись надежностью P = 0,95, по таблице коэффициентов Стьюдента для пяти измерений находим t = 2,77. Абсолютная ошибка находится по формуле:

$\Delta h = S_{\bar{x}} \cdot t,$ $\Delta h =$

Сравните случайную и систематическую ошибки:

$$\frac{\Delta h}{\delta} =$$

Если $\frac{\Delta h}{\delta} \leq 3$, то отбрасывать δ нельзя, так как величина погрешности результата измерения *ΔD* сравнима с величиной погрешности прибора δ, и в качестве границы доверительного интервала следует взять

$\Delta h = \sqrt{(S_{\bar{x}} \cdot t)^2 + \delta^2}$ , $\Delta h =$

Окончательный результат запишите в виде

$h = ($ $\pm$ $)$ *мм* при P = 0.95.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\bar{x}} \cdot 100\% =$$

3) Вычислите объем цилиндра и оцените точность измерения (как для косвенного измерения):

Объем цилиндра находится по формуле

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h,$$

где d –диаметр цилиндра, h – высота цилиндра.

Все эти величины мы определили непосредственно в ходе работы (см. выше):

d = ( $\pm$ ) *мм,*

h = ( $\pm$ ) *мм,* при одинаковой надежности P = 0.95.

Определите среднее значение объема согласно формуле:

$$\bar{V} = \frac{\pi \bar{d}^2}{4} \bar{h} ,$$

$\bar{V} =$

Для нахождения **случайной ошибки** косвенного измерения используется формула:

$$\Delta N = \pm \bar{N} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \Delta z\right)^2 + \ldots}$$

Воспользовавшись этим выражением, имеем:

ln V = ln π + lnh + 2lnd - ln4

$$\frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}; \qquad \frac{\partial \ln V}{\partial d} = \frac{2}{d};$$

$$\Delta V = \pm \overline{V} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{h}\Delta h\right)^2 + \left(\frac{2}{d}\Delta D\right)^2}$$

$\Delta V =$

На практике часто можно ограничиться нахождением верхней оценки $\Delta\Phi$:

$$\Delta f = \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta f}{\delta x_i} \Delta x_i \ .$$

Таким образом, результат измерения оказывается равным

V = (  ±  ) мм$^3$  при P = 0.95.

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{\overline{V}} \cdot 100\% =$$

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**

# ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

(«Механика», «Свободное падение тел»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- Знакомство с применением физической модели МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА (МТ).
- Исследование движения МТ с постоянным ускорением.
- Экспериментальное определение ускорения свободного падения у поверхности Земли.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА это абстрактный объект (модель), не имеющий размеров, но обладающий другими характеристиками реального тела.

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

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ есть изменение положения тела в пространстве со временем. Закон движения - это функция $\vec{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$.

СКОРОСТЬ есть векторная кинематическая характеристика движения, показывающая быстроту и направление движения. Математически $\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt}$.

УСКОРЕНИЕ есть векторная кинематическая характеристика движения, показывающая быстроту и направление изменения скорости. Математически $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}$.

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

Для движения с постоянным ускорением закон движения

$\vec{r}(t) = \vec{r}_o + \vec{v}_o t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$, где $\vec{r}_o$ - начальное положение и $\vec{v}_o$ - начальная скорость МТ. Закон скорости: $\vec{v}(t) = \vec{v}_o + \vec{a}t$.

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

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

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

ПОЛНОЕ УСКОРЕНИЕ определяется по теореме Пифагора: $|\vec{a}| = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$.

**ЗАДАНИЕ: Выведите формулу для $y_{max}$ максимальной высоты подъема тела (в черновике).**

УКАЗАНИЯ: Для верхней точки траектории вертикальная проекция скорости равна нулю. Из уравнения $v_y(t_{ДВ}) = 0$, выразите $t_{ДВ}$ и подставьте в формулу для y(t).

**МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

Выключите “Стробоскоп”, установив маркер мыши на квадрат с крестиком и нажав (коротко) на левую кнопку мыши.

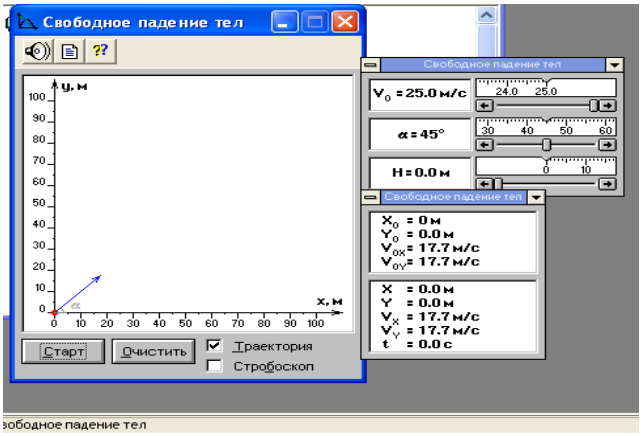



Рис. 1

Нажмите мышью кнопку «СТАРТ». Внимательно рассмотрите картинку в средней части монитора. Найдите регуляторы с движками, задающие высоту h, начальную скорость $V_0$ и угол бросания $\alpha$. Подведите маркер мыши к движку регулятора высоты, нажмите и удерживайте левую кнопку мыши, двигая мышь вниз. Движок регулятора будет двигаться за маркером мыши. Доведите его до положения, соответствующего высоте h, указанной в табл.1 для вашей бригады. Тем же методом «зацепив мышью и двигая движок регулятора» или щелкая мышью по стрелке на движке, установите значения угла бросания, указанные в табл.1 (см. ниже) для вашей бригады.

Найдите кнопку «Pause» на клавиатуре компьютера в верхнем ряду (справа). Будьте готовы быстро нажать ее. Нажмите мышью кнопку «Старт» внизу экрана и, когда МТ будет в верхней точке траектории (вертикальная компонента скорости $V_Y$ должна быть мала), остановите движение кнопкой «Pause» Запомните значение высоты, показанное справа. Для продолжения движения тела нужно нажать клавишу ПРОБЕЛ (самая длинная внизу на клавиатуре). Потренируйтесь, очищая экран (кнопка «Очистить» на экране), повторяя запуск (кнопка «Старт» на экране) и сравнивая полученные значения высоты.

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

Проведите измерения на первой траектории, записывая результаты пяти измерений координаты $y_{max}$ в таблицу 2, образец которой приведен ниже. Повторите измерения для четырех других траекторий, начальные параметры движения для которых указаны в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1. Начальные параметры траекторий**

| Номер бригады | Начальная высота h,(м) | Начальный угол α,(град) | Номер бригады | Начальная высота h,(м) | Начальный угол α,(град) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 60 | 5 | 10 | 45 |
| 2 | 30 | 60 | 6 | 30 | 45 |
| 3 | 50 | 60 | 7 | 50 | 45 |
| 4 | 65 | 60 | 8 | 65 | 45 |

**Таблица 2. Результаты измерений**

| № изм. | Траектор. 1 $v_o$ = 15 м/с $v_0^2$= (м/с)$^2$ | | Траектор. 2 $v_o$ = 17 м/с $v_0^2$= (м/с)$^2$ | | Траектор. 3 $v_o$ = 19 м/с $v_0^2$= (м/с)$^2$ | | Траектор. 4 $v_o$ = 22 м/с $v_0^2$= (м/с)$^2$ | | Траектор. 5 $v_o$ = 25 м/с $v_0^2$= (м/с)$^2$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $y_{max}$, м | $\Delta y_{max}$, м | $y_{max}$, м | $\Delta y_{max}$, м | $y_{max}$, м | $\Delta y_{max}$, м | $y_{max}$, м | $\Delta y_{max}$, м | $y_{max}$, м | $\Delta y_{max}$, м |
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| $<y_{MAX}>$ | | | | | | | | | | |
| $\delta_y$ | | | | | | | | | | |

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

1. Вычислите и запишите в таблицу средние значения вертикальной координаты точки максимального подъема $<y_{MAX}>$ и отклонения $\Delta y_{MAX}$ измеренного значения от среднего.
2. Постройте график зависимости средних значений вертикальной координаты точки максимального подъема $<y_{MAX}>$ от квадрата начальной скорости.

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

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

$$g = \frac{1}{2} Sin^2(\alpha) \frac{\Delta(v_o^2)}{\Delta(y_{\max})} =$$

4. . Вычислите ошибку среднего значения g, используя формулу:

$$\varepsilon = \frac{\delta g}{\langle g \rangle} = 2ctg\,\alpha \cdot \delta\alpha + \frac{\delta v_{01} + \delta v_{02}}{v_{01} + v_{02}} + \frac{\delta v_{01} + \delta v_{02}}{v_{02} - v_{01}} + \frac{\delta y_{\max 2} + \delta y_{\max 1}}{y_{\max 2} - y_{\max 1}} =$$

$$2ctg\,\alpha \cdot \delta\alpha + \frac{2\delta v_0}{v_{01} + v_{02}} + \frac{2\delta v_0}{v_{02} - v_{01}} + \frac{2\delta y_{\max}}{y_{\max 2} - y_{\max 1}} = 2\,ctg\,__^{0} \cdot 0{,}0087 + \frac{2 \cdot 0{,}05}{} + \frac{2 \cdot 0{,}05}{} + \frac{2 \cdot 0{,}05}{}$$

=

$$\delta g = \varepsilon \cdot \langle g \rangle =$$

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчётов получено значение ускорения свободного падения, равное

$$g = (\qquad \pm \qquad) \frac{м}{c^2}$$

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ: полученное экспериментально значение ускорения свободного падения, равное _____ с точностью до ошибки измерений, составляющей _____ , совпадает (не совпадает) с табличным значением данной величины, равным

**Вопросы и задания для самоконтроля по работе**

1. Дайте определение материальной точки.
2. Как определяется положение материальной точки?
3. Дайте определение системы отсчета.
4. Что такое декартова система координат?
5. Дайте определение механического движения.
6. Что такое скорость материальной точки?
7. Как математически записывается быстрота изменения какой либо переменной величины?
8. Дайте определение ускорения МТ?
9. Что такое траектория движения МТ?
10. Что такое закон движения?
11. Запишите закон движения для движения МТ с постоянным ускорением.
12. Запишите закон изменения скорости для движения МТ с постоянным ускорением.
13. Дайте определение пути при произвольном движении МТ.
14. Напишите формулу для вычисления пути при произвольном движении МТ.
15. Дайте определение средней скорости. Напишите формулу для ее вычисления.
16. Дайте определение тангенциального ускорения.
17. Дайте определение нормального ускорения.
18. Напишите формулу для вычисления величины полного ускорения по известным тангенциальному и нормальному ускорениям.
19. Как движется МТ, если ускорение остается все время направленным вдоль скорости?
20. Как движется МТ, если ускорение все время направлено против скорости?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**

# ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

## Цель работы

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

## Краткая теория

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

Элементарной вероятностью $dP_V$ при измерении **величины скорости** $v$ называется вероятность наличия скорости величиной от $v$ до $v + dv$. Эта вероятность пропорциональна приращению скорости $dv$: $dP_V = F(v)\,dv$, где коэффициент пропорциональности $F(v)$ называется **функцией распределения** молекул по величине скорости. Она может быть выражена через другие функции распределения:

$$F(v) = \varphi(v_X)\cdot\varphi(v_Y)\cdot\varphi(v_Z)\cdot 4\pi v^2 = f(v)\cdot 4\pi v^2,$$

где $\varphi(v_X)$, $\cdot\varphi(v_Y)$ и$\cdot\varphi(v_Z)$ – функции распределения для соответствующих **проекций** скоростей молекул, а $f(v)$ – их произведение.

В §98 Вы можете найти вывод формул, в частности

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

Средняя скорость $$< v >= \int_0^\infty vF(v)dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

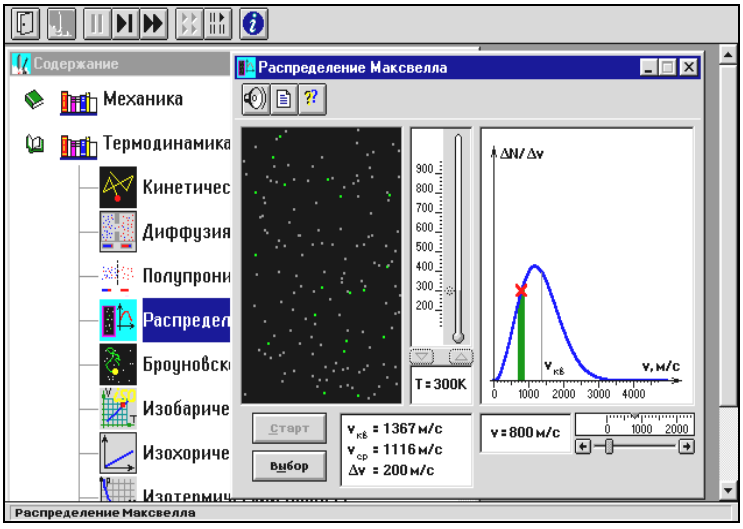
Средняя квадратичная скорость $v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$.

Наиболее вероятной называется скорость $v_{\text{ВЕР}}$, при которой $F(v)$ имеет максимум

$$v_{\text{ВЕР}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

## Методика и порядок измерений

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




Измерения

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

2. Установите скорость выделенной группы молекул вблизи минимального заданного в форме 1 значения.

3. Нажмите клавишу «||» и подсчитайте на «мгновенной фотографии» количество молекул $\Delta N$, скорости которых лежат в заданном диапазоне $\Delta v$ вблизи заданной скорости молекул $v$ (они более яркие). Результат запишите в таблицу по форме 1.

4. Нажмите кнопку «▶▶» и через 10–20 секунд получите еще одну мгновенную фотографию (нажав кнопку «||»). Подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результат запишите в таблицу по форме 1.

5. Повторите еще 3 раза измерения для данной скорости и результаты запишите в таблицу2.

6. Измените скорость до значения, указанного в форме 1, и выполните по 5 измерений (как в п.4) для каждой скорости.

7. Установите (как в п.1) вторую температуру $T_2$ из табл.1. Запишите для нее значение наиболее вероятной скорости.

8. Повторите измерения (по п. 2,3,4,5), записывая результат в таблицу 3.

Примерные значения температуры Табл. 1

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_1$ | 160 | 200 | 260 | 300 | 360 | 400 | 460 | 500 |
| $T_2$ | 700 | 740 | 760 | 800 | 840 | 860 | 900 | 960 |

Результаты измерений при $T$ = ____ K Табл. 2

| $v$ [км/с]= | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | $\upsilon_{вер}$= |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta N_1$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_2$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_3$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_4$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_5$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_{СР}$ | | | | | | | | |

Результаты измерений при ***T* = ____ K** Табл. 3

| $\upsilon$ [км/с]= | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | $\upsilon_{вер}$= |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta N_1$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_2$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_3$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_4$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_5$ | | | | | | | | |
| $\Delta N_{СР}$ | | | | | | | | |

**Обработка результатов и оформление отчета**

9.Вычислите и запишите в таблицы средние значения количества частиц $\Delta N_{СР}$, скорости которых лежат в данном диапазоне от $\upsilon$ до $\upsilon + \Delta \upsilon$.

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

**Вывод по графику:** Полученный экспериментально график зависимости _____ _____ от_____ _____ имеет вид _____ и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид :

11. Для каждой температуры определите экспериментальное значение наиболее вероятной скорости молекул $\upsilon_{\text{вер}}$. Вычислите квадрат вероятной скорости и занесите в таблицу 4.

Табл. 4

| | | |
|---|---|---|
| $T_1$ = | $\upsilon_{\text{вер }1}$ = | $\upsilon^2_{\text{вер }1}$ = |
| $T_2$ = | $\upsilon_{\text{вер }2}$ = | $\upsilon^2_{\text{вер }2}$ = |

12. Постройте график зависимости квадрата наиболее вероятной скорости от температуры $v^2_{\text{ВЕР}}(T)$.

13. По данному графику определите значение массы молекулы

$$m = 2k\frac{\Delta(T)}{\Delta(v^2_{\text{ВЕР}})} =$$

14.Оцените погрешность:

15. Подберите газ, масса молекулы которого достаточно близка к измеренной массе молекулы. Этот газ:

Табличные значения

| Газ | Водород | Гелий | Неон | Азот | Кислород |
|---|---|---|---|---|---|
| Масса молекулы $10^{-27}$ кг | 3.32 | 6.64 | 33.2 | 46.5 | 53.12 |

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения.
2. Дайте определение элементарной вероятности при измерении величины скорости.
3. Что такое функция распределения?
4. Каковы особенности графика функции распределения величины скорости для молекул идеального газа?
5. Как вычисляется среднее значение некоторой физической величины *A*, если известна ее функция распределения *f*(*A*)?
6. Напишите формулу для вычисления среднего значения скорости молекул.
7. Напишите формулу для вычисления средней квадратичной скорости молекул.
8. Напишите условие для вычисления наиболее вероятной скорости молекул.
9. Напишите выражение для средней скорости молекул идеального газа.
10. Напишите выражение для средней квадратичной скорости молекул идеального газа.
11. Напишите выражение для наиболее вероятной скорости молекул идеального газа.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4**

# АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

(«Термодинамика и молекулярная физика», «Адиабатический процесс»)

**Цель работы**

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

**Краткая теория**

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

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

Обратимым называется процесс, при реализации которого в обратном направлении система проходит через **те же состояния**, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности, и при этом в окружающей среде не происходит никаких изменений. Равновесные процессы всегда обратимы.

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

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева - Клапейрона)

$$PV = \frac{m}{\mu} RT$$

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

$$C_{\text{тела}} = \frac{dQ}{dT}$$

Удельной теплоемкостью вещества называется отношение теплоемкости к массе тела:

$$c = \frac{dQ}{m\,dT}$$

Молярной теплоёмкостью называется отношение теплоёмкости тела к количеству вещества

$$C_\mu = \frac{dQ}{\mu\,dT}$$

Если тело не меняет свой объем, то оно не совершает работы, поэтому при постоянном объеме тела переданное телу тепло $dQ'$ идет на изменение его внутренней энергии $dU$.

Теплоемкость при постоянном объеме

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R$$

Теплоемкость при постоянном давлении идеального газа, молекулы которого имеют $i$ степеней свободы:

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_p = \frac{dU}{dT} + p\left(\frac{dV}{dT}\right)_p = \frac{i+2}{2}\frac{m}{\mu}R \qquad (1)$$

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

Формула

$$\gamma = 1 + \frac{2}{i} \tag{2}$$

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

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

Поступательное движение всегда имеет 3 степени свободы.

Вращательное движение имеет 2 степени свободы для линейной молекулы и 3 степени свободы, если атомы в молекуле не расположены на одной линии.

Колебательное движение дает $2n_{КОЛ}$ степеней свободы, где $n_{КОЛ}$ – количество независимых колебаний атомов в молекуле (у двухатомной молекулы $n_{КОЛ} = 1$).

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

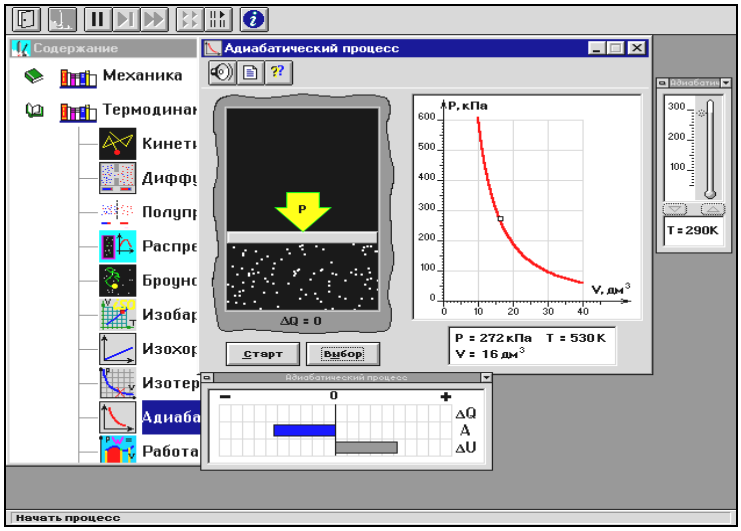
$$PV^{\gamma} = const \tag{3}$$

Работа газа в адиабатическом процессе

$$A_{1\to 2} = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2) \tag{4}$$

Принято также выделять изотермический, изобарический и изохорический процессы.

## Методика и порядок измерений




Измерения

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

Нажмите мышью кнопку «СТАРТ» на экране и наблюдайте перемещение поршня и перемещение точки по красной кривой адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «СТОП». Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «СТАРТ».

После автоматической остановки процесса запустите его снова, нажав кнопку «СТАРТ», и останавливайте, нажимая кнопку «СТОП», когда крестик на теоретической адиабате (красная кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: 15, 20, 25, 30, 35 и 40 дм$^3$ (6 значений), записывая при остановке значения объема, температуры и давления в таблицу 2.

Установите новое значение температуры $T_2$, взяв его из табл.1, задавая $V_{НАЧ} = 40$ дм$^3$, и повторите измерения, записывая результаты в таблицу 3.

**Начальные значения температуры**

Таблица 1

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_1$ | 50 | 70 | 100 | 120 | 140 | 170 | 200 | 220 |
| $T_2$ | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |

**Результаты измерений**

Для $T_1$ = Таблица 2

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $T$[К] | | | | | | |
| $V$[м$^3$] | | | | | | |
| $ln\ V$ | | | | | | |
| $p$[Па] | | | | | | |
| $ln\ p$ | | | | | | |

Для $T_2$ = Таблица 3

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $T$[К] | | | | | | |
| $V$[м$^3$] | | | | | | |
| $ln\ V$ | | | | | | |
| $p$[Па] | | | | | | |
| $ln\ p$ | | | | | | |

**Обработка результатов и оформление отчета**

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

**Вывод по графику:** Полученный экспериментально график зависимости _____ _____ от_____ _____ имеет вид _____ и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид :

2. Для каждой адиабаты определите по графику экспериментальное значение показателя, используя формулу

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

$\gamma_1 = -\frac{\Delta_1(\ln p)}{\Delta_1(\ln V)} =$ $\gamma_2 = -\frac{\Delta_2(\ln p)}{\Delta_2(\ln V)} =$

3. Определите число степеней свободы молекулы газа, исследуемого в данной компьютерной модели, используя формулу (2):

$i =$ $i_1 =$ $i_2 =$

4. Оцените погрешности.

5. Подберите распространенный газ, структура молекулы которого близка к наблюдаемой:

6. Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

**Ответ**: По результатам измерений и расчетов получено значение _____, равное

$i =$ $\pm$

**Вывод по ответу**: Полученное экспериментально значение величины _____ _____ , равное _____ , с точностью до ошибки измерений, составляющей _____ , совпадает (не совпадает) с теоретическим значением данной величины, равным _____ .

**Вопросы и задания для самоконтроля**

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

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5**

# ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО-ГАУССА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВАКУУМЕ

(«Электричество и магнетизм», «Электрическое поле точечных зарядов»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- Знакомство с графическим моделированием электростатических полей.
- Экспериментальная проверка теоремы Остроградского-Гаусса.
- Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ в данной точке есть векторная физическая величина, равная отношению силы F действующей со стороны поля на неподвижный точечный заряд $q_0$, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

ЛИНИЯМИ НАПРЯЖЁННОСТИ (силовыми линиями) называются линии, проведённые в поле так, что касательные к ним в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряжённости. Линии напряжённости проводят так, что они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. (Рис. 1)

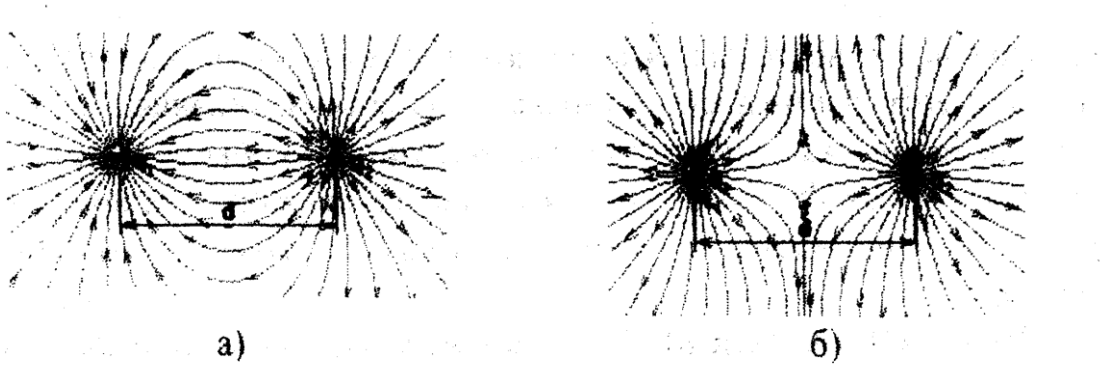



Рис 1. Линии напряжённости двух точечных зарядов: а) разноимённых; б) одноимённых

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ: напряжённость электростатического поля систем точечных зарядов равна векторной сумме напряжённостей полей каждого из этих зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i$$

ПОТОК ВЕКТОРА НАПРЯЖЁННОСТИ.

Силовая линия, определяя направление вектора напряжённости, сама по себе не определяет величину модуля вектора напряжённости. Введём условие, связывающее величину модуля вектора напряжённости с числом проводимых линий напряженности через единицу площади. Для этого выделим в электростатическом поле малую область, в пределах которой электростатическое поле мощно считать однородным. Проведём в этой области элементарную площадку $dS_0$, перпендикулярную к линиям напряжённости. Условимся через эту площадку проводить такое число dФ линий напряжённости, чтобы число линий, приходящихся на единицу поверхности площадки $dS_0$ равнялось величине модуля вектора напряжённости в области этой площадки, т.е. потребуем выполнения условия:

$$\frac{d\Phi}{dS_0} = E \qquad (1)$$

При выполнении этого условия графического изображения электростатических полей численное значение вектора напряжённости будет связано с густотой линий напряжённости. Тогда число линий напряжённости пронизывающих элементарную площадку dS, нормаль *n* которой образует угол α с вектором E ; равно

$$d\Phi = EdS\cos\alpha \qquad (2)$$

где величина d$\Phi$ называется потоком вектора напряжённости через площадку dS

Число линий напряжённости Ф, пронизывающих некоторую поверхность S, назовём *потоком вектор напряжённости через эту поверхность.* Для произвольной замкнутой поверхности S поток вектора *E* сквозь эту поверхность будет равен

$$\Phi = \oint_S EdS\cos\alpha \qquad (3)$$

Для замкнутой поверхности принято считать положительным направление нормали к элементу поверхности, выходящее из объёма, ограничиваемого поверхностью. *Тогда линии напряжённости, выходящие из объёма, создадут положительный поток $\Phi_+$, линии, входящие в объём, создадут отрицательный поток $\Phi_-$ а результирующий поток будет равен алгебраической сумме этих потоков*

ТЕОРЕМА ОСТРОГ?АДСКОГО-Г АУССА: *поток вектора напряжённости электростатического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключённых внутри этой поверхности зарядов, делённой на $\varepsilon_0$*

$$\Phi_+ + \Phi_- = \Phi = \oint_S EdS\cos\alpha = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n} q_i \qquad (4)$$

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

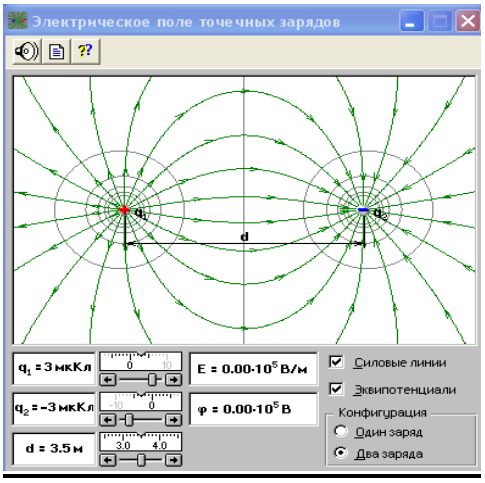



Рис. 2

Как известно, электростатическое поле в вакууме изотропное. Следовательно, количество силовых линий, пересекающих произвольную замкнутую поверхность, содержащую внутри себя электрические заряды, будет пропорционально количеству силовых линий, пересекающих замкнутый контур, ограничивающий площадь сечения, в которой находятся электрические заделы этой замкнутой поверхности.

Такое допущение даёт возможность привести в количественное соответствие реальное трёхмерное электростатическое поле с его графической интерпретацией в плоской компьютерной модели, которая показана на рис. 2. Для этого определим число силовых линий *Ф,* которые фактически должны пересекать произвольную замкнутую поверхность, внутри которой находится элек-

трический заряд q = 1мкКл. По теореме Остроградского-Гаусса имеем:

$$\Phi = \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 1.13 \cdot 10^5$$

Откройте окно опыта. В нижнем правом прямоугольнике «Конфигурация» щёлкните мышью на кнопке «Один заряд». Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора величины заряда и установите значение $q_1$= +1 мкКл. Подсчитайте число силовых линий; выходящих из заряда. Их должно быть 6. Следовательно, силовая линия в плоской компьютерной модели опыта соответствует

$$N = \frac{1{,}13 \cdot 10^5}{6} = 1.88 \cdot 10^4 \qquad (5)$$

линиям реального трёхмерного кулоновского поля. На основании таких допущений и оценок создаётся возможность экспериментальной проверки теоремы Остроградского-Гаусса с помощью графического компьютерного моделирования электростатических полей в данной лабораторной, работе.

**ЭКСПЕРИМЕНТ 1.** ***(Постоянное пространственное распределение переменного заряда внутри замкнутой поверхности)***

1. В нижнем правом прямоугольнике «Конфигурация» нажмите мышью кнопку «Два заряда».
2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора первого заряда до установления значения, указанного в табл. ! для вашей бригады.

**Таблица 1. Установочные значения физических параметров для проведения экспериментов**

| Бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Эксперимент 1 | | | | | | | | |
| $q_1$,мкКл | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -4 | -3 | -2 |
| d,м | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Эксперимент 2 | | | | | | | | |
| $q_1$,мкКл | -5 | -5 | -5 | -5 | -5 | -4 | -4 | -4 |
| $q_2$, мкКл | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +4 | +3 | +2 |

3. Аналогичным образом установите заданное в табл.1 расстояние d между зарядами.
4. Установите мышью на кнопке «Силовые линии» флажок.
5. Установите величину второго заряда 0 и подсчитайте число иловых линий $\Phi_+$ выходящих и $\Phi_-$ входящих через границы замкнутого контура, которым в нашем опыте будет являться прямоугольная рамка окна опыта. При этом внимательно смотрите за направлением стрелок на силовых линиях поля. Запишите эти данные и разность $\Phi = \Phi_- - \Phi_+$ в таблицу 2.

**Таблица 2. Результаты измерений в эксперименте 1**

$q_1$= ___ мкКл, d= ___ м

| $q_2$=0 мкКл | | | $q_2$=+1 мкКл | | | $q_2$=+2 мкКл | | | $q_2$=+3 мкКл | | | $q_2$=+4 мкКл | | | $q_2$=+5 мкКл | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Phi_-$ | $\Phi_+$ | $\Phi$ | $\Phi_-$ | $\Phi_+$ | $\Phi$ | $\Phi_-$ | $\Phi_+$ | $\Phi$ | $\Phi_-$ | $\Phi_+$ | $\Phi$ | $\Phi_-$ | $\Phi_+$ | $\Phi$ | $\Phi_-$ | $\Phi_+$ | $\Phi$ |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

6. Последовательно устанавливайте заряды: $q_2$ = +1, +2, +3, +4,.+5мкКл, и выполните п.5 ещё 5 раз.

**ЭКСПЕРИМЕНТ 2.** ***(Переменное пространственное распределение постоянного заряда внутри заткнутой поверхности)***

1.Установите значения $q_1$ и $q_2$ соответствующие значениям, указанным в таблице 1 для вашей бригады.

2.Установите также минимальное расстояние между зарядами $d$ = 2м и на экране окна эксперимента, подсчетом определите числа $Ф_+$, $Ф_-$ и Ф.

3.Последовательно увеличивай расстояние между зарядами с шагом 0,5м, выполните п. 2 ещё 6 раз.

4.Результаты измерений запишите в табл. 3.

**Таблица 3. Результаты измерений в эксперименте 2**

$q_{2=}$ _____ мкКл $q_{1=}$ _____ мкКл

| d=2 м | | | d=3 м | | | d=3,5 м | | | d=4 м | | | d=4,5 м | | | d=5 м | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Ф_-$ | $Ф_+$ | Ф | $Ф_-$ | $Ф_+$ | Ф | $Ф_-$ | $Ф_+$ | Ф | $Ф_-$ | $Ф_+$ | Ф | $Ф_-$ | $Ф_+$ | Ф | $Ф_-$ | $Ф_+$ | Ф |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛ ЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. Постройте по данным табл.2 график зависимости потока вектора напряжённости $Ф$ от величины заряда $q=(q_1+q_2)$

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

2. По котангенсу угла наклона графика и используя ф-лы (4) и (5), определите электрическую постоянную $\varepsilon_0$.

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta q}{\Delta \Phi} =$$

3. Оцените погрешность полученного результата:

ОТВЕТ: По результатам измерений и асчётов получено значение _____ , равное

$$\varepsilon_0 = (\quad \pm \quad)\cdot 10$$

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ: полученное экспериментально значение величины_____ , равное с точностью до ошибки измерений, составляющей , совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным

4. По данным, приведённым в табл.3, постройте график зависимости потока вектора напряжённости *Ф* от расстояния между зарядами d.

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Какие поля называют электростатическими?
2. Что такое напряжённость электростатического поля?
3. Как определяется направление вектора напряжённости?
4. Что такое поток вектора напряжённости?
5. Какая линия называется силовой? Почему они не могу пересекаться?
6. Какая линия называется эквипотенциальной
7. Докажите, что эквипотенциальные и силовые линии ортогональны.
8. От чего зависит густота силовых и эквипотенциальных линий?
9. В чём заключается физический смысл теоремы Остроградского-Гаусса?
10. Рассчитайте, используя теорему О-Г,
    а) поле равномерно заряженной бесконечной плоскости;
    б) поле двух бесконечных параллельных разноимённо заряженных плоскостей;
    в) поле равномерно заряженной сферической поверхности;
    г) поле объёмно заряженного шара;
    д) поле равномерно заряженного бесконечного цилиндра (нити);
11. Каким образом теорема ОГ и следствия из неё могут быть косвенным подтверждением справедливости закона Кулона?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6**

# ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНООДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ

(«Электричество и магнетизм», «Цепи постоянного тока»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

• Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.

• Экспериментальное подтверждение закона Ома для неоднородного участка цепи.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ (СИЛЫ) ТОКА: $I = \frac{dq}{dt}$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ: величина (сила) тока, текущего ПО однородному (в смысле отсутствия сторонних сил) металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения *U* на проводнике $I = \frac{1}{U}R$, где *R* - сопротивление проводника.

РЕЗИСТОРОМ называется устройство, обладающее заданным постоянным сопротивлением.

РЕОСТАТОМ называется переменное сопротивление.

НАПРЯЖЕНИЕМ НА УЧАСТКЕ ЦЕПИ 1-2 называется физическая величина, определяемая выражением $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ:

$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}}{R}$, где $\varphi_1$ и $\varphi_2$ - потенциалы концов участка, $E_{12}$ - э.д.с, действующая на данном участке цепи.

Применяя закон Ома для неоднородного участка цепи, необходимо помнить о правиле выбора знаков: *произведение* IR *следует брать со знаком «+», если направление обхода совпадает с направлением тока на этом участке,* ***э.д.с.*** $E_{12}$ *будет иметь знак «+», если её направление (от минуса к плюсу) совпадает с направлением обхода.* При этом надо иметь в виду, что вольтметр, подключенный к концам любого участка цепи, будет показывать разность потенциалов между точками подключения прибора, а направление отклонения стрелки прибора будет определяться параметрами внешней цепи.

Таким образом, закон Ома для полной цепи можно записать в виде

$I(R+r) = \pm V + E_{12}$ (1)

Из формулы (1) видно, что при $1 = 0$ вольтметр покажет э.д.с. источника, включенного в данный участок цепи.

**МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**

**В данной лабораторной работе изучается модель электрической цепи, содержащей на одном из своих участков источник электродвижущей силы (э.д.с.). На этом участке, в зависимости от соотношений между параметрами цепи, разность потенциалов между его крайними точками может менять знак, переходя через 0.**

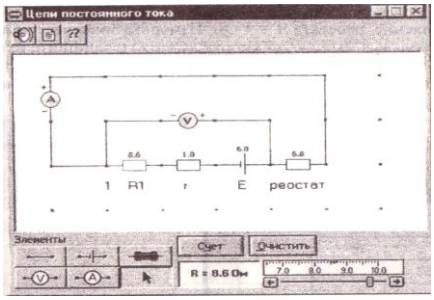



Рис.1.

**ИЗМЕРЕНИЯ:**

6.Соберите на экране опыта замкнутую цепь, показанную на рис. 1.

Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши на кнопке э.д.с. в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где должен быть расположен источник э.д.с.

7. Разместите далее последовательно с источником резисторы, выполняющие функции его внутреннего сопротивления *r* и сопротивления неоднородного участка $R_1$ (нажав предварительно кнопку в нижней части экрана), и амперметр (кнопка там же). Затем расположите резистор нагрузки (реостат) и последовательно соединенный с ним амперметр. Над участком пени расположите вольтметр , измеряющий разность потенциалов на этом неоднородном участке цепи.

8. Соедините все указанные приборы в замкнутую цепь. Для этого нажмите кнопку соединительного провода внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкайте левой кнопкой мыши в необходимых местах рабочей зоны и сформируйте замкнутую цепь, показанную на рис. 1.

9. Установите заданные значения параметров для каждого прибора цепи. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой . Затем щелкните на данном приборе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, установите значения $R_1$, *r, E*, которые указаны в таблице 1 для вашей бригады.

**Таблица 1. Значения ЭДС, внутреннего сопротивления источника r и $R_1$**

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_1$, В | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| $E_2$, В | - 2,5 | - 3,5 | - 4,0 | - 3,5 | - 3,0 | - 4,5 | - 5,0 | - 5,5 |
| r, Ом | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 |
| $R_1$, Ом | 8,0 | 7,5 | 7,0 | 6,5 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10,0 |

10. Установите сопротивление реостата R = 1 Ом. Измерьте значения тока и разности потенциалов (щелкнув мышью по кнопке «Счет») и запишите их в таблицу 2.

**Таблица 2. Результаты измерений**

| № | $E_1$= | $R_1$= | r = | $E_1$= | $E_2$= | $R_1$= | r = |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| измерения | R (Ом) | U (В) | I (А) | R (Ом) | U (В) | I (А) | |
| 1 | 1 | | | 1 | | | |
| 2 | 2 | | | 2 | | | |
| 3 | 3 | | | 3 | | | |
| 4 | 4 | | | 4 | | | |
| 5 | 5 | | | 5 | | | |
| 6 | 6 | | | 6 | | | |
| 7 | 7 | | | 7 | | | |
| 8 | 8 | | | 8 | | | |
| 9 | 9 | | | 9 | | | |
| 10 | 10 | | | 10 | | | |

11. Увеличивая сопротивление реостата К каждый раз на Юм, повторите измерения силы тока

и разности потенциалов по п.5 и заполните таблицу 2.

12. Включите в схему второй источник питания, как показано на рис.2, и установите значение $E_2$, соответствующее номеру вашей бригады.

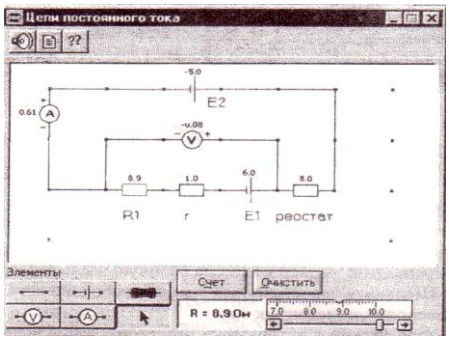



Рис.2

13.Проведите на второй схеме (рис.2) все измерения п.п. 5,6.

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. На одном графике покажите зависимость показаний вольтметра (ось ординат) от силы тока для первой и второй схем (ось абсцисс).

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

2.Экстраполируя оба графика до пересечения с осью ординат, определите по формуле (1) экспериментально установленное значение э.д.с. *($E_1$)* источника тока, включённого в неоднородный участок цепи, и сравните его с установочным значением.

3. По тангенсу наклона прямой к оси I определите полное сопротивление участка для двух схем и сравните его значение с установочным значением.

$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} =$

4. Рассчитайте погрешности измерений и запишите окончательный результат.

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчётов получены значения _____ , равные

E = ( ± ) В

R = ( ± ) Ом

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ: полученные экспериментально значения величин_____ , равные _____ и _____с точностью до ошибок измерений, составляющих и , совпадают (не совпадают) с установленными значениями данных величин, равными и

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определения понятий: разность потенциалов, э.д.с, источника тока, напряжение на участке цепи.

2. Что называется сторонней силой? Какова её природа?

3. Укажите правильное выражение закона Ома для неоднородного участка цепи, показанного на рисунке:

1) $IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + E$; 2) $IR = (\varphi_1 - \varphi_2) - E$ ; 3) $IR = E - (\varphi_1 - \varphi_2)$ ; 4) $IR = E$; 5) $IR = (\varphi_1 - \varphi_2)$

2. Выведите Закон Ома в дифференциальной форме.

3. Что называется удельным сопротивлением проводника? От чего оно зависит?

4. Сформулируйте правила Кирхгофа для разветвлённых цепей.

5. Выведите формулы сопротивлений батарей последовательно и параллельно соединённых резисторов.

6. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.

7. Объясните принцип действия экспериментальной установки. В чём принципиальная разница первого и второго варианта схем?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7**

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

(«Электричество и магнетизм», «Электромагнитная индукция»)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

•Знакомство с моделированием явления электромагнитной индукции (ЭМИ).

•Экспериментальное подтверждение закономерностей ЭМИ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ЭЛЕМЕНТАРНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ dФв через физически малый элемент поверхности площадью dS называется скалярное произведение вектора индукции магнитного поля $\vec{B}$ на вектор нормали $\vec{n}$ к данному элементу поверхности и на площадь dS:

dФв= $(\vec{B}\,\vec{n})\cdot$ dS

МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ Фв через поверхность площадью S называется сумма всех элементарных потоков через все элементы этой поверхности (интеграл по поверхности):

Фв = $\int \vec{B}\cdot\overrightarrow{ds}$

Анализируя свойства интеграла в правой части данною соотношения, можем получить условия, когда для определении потоке не требуется интегрирование.

Простейший вариант: потока нет (Фв = 0), если 1)B = 0 или 2) вектор магнитной индукции направлен по касательной к поверхности в любой ее точке ($\vec{B}\perp\vec{n}$).

Второй вариант: поток есть произведение индукции на площадь (Фв = BS). если ($\vec{B}\cdot\vec{n}$) = const , т.е. одновременно выполняются два условия: вектор индукции направлен по нормали и имеет одну и ту же величину в любой точке поверхности.

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

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИЕЙ (ЭМИ) называется явление возникновения электрического поля при изменении магнитного поля.

ЗАКОН ЭМИ: циркуляция электрического поля по замкнутому контуру Гое пропорциональна быстроте изменения потока магнитного поля Фов через замкнутую поверхность So ограниченную контуром L0 , по которому рассчитана циркуляция. Математически: $\Gamma_{oE} = -\frac{d\Phi}{dt}$ , где знак – соответствует «правилу Ленца» В расшифрованном виде

$$\oint_{L_0} \vec{E}d\vec{L} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\iint_{S(l_0)} \vec{B}d\vec{S}\right)$$

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

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

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

$$E_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

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

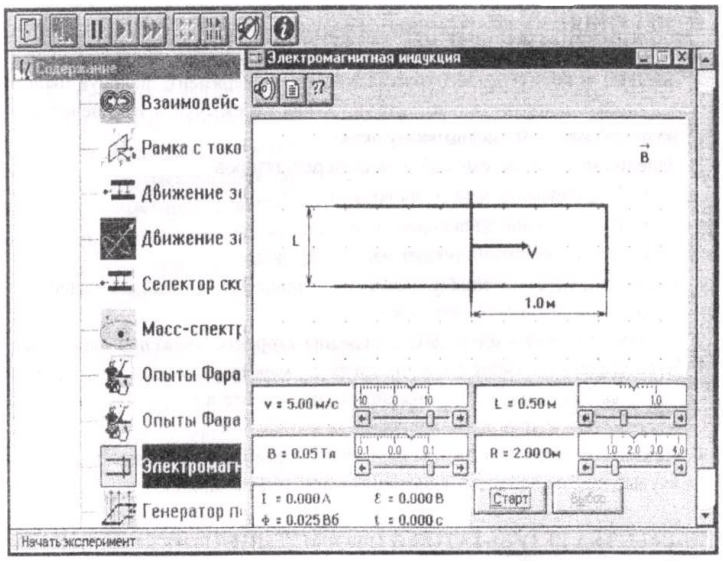
Обозначая ЭДС индукции символом εинд и используя закон Ома для полной цепи, получим выражение для тока индукции iинд = εинд/R, где R –сопротивление контура.

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

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

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

Эта система изображена на рисунке:




ИЗМЕРЕНИЯ:

1. Запустите эксперимент, щёлкнув мышью по кнопке «старт». Наблюдайте движение перемычки и изменение магнитного потока Ф (цифры внизу окна).
2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов:
   - L - расстояние между проводами,
   - R – сопротивление перемычки,
   - B1 – величины индукции магнитного поля

   и зафиксируйте значения, указанные в таблице № А и под ней для вашей бригады.

Таблица А.

| Бригады | R, Ом | B1, мТл | B2, мТл | B3, мТл |
|---|---|---|---|---|
| 1 и 5 | 1 | - 30 | 40 | 90 |
| 2 и 6 | 2 | - 40 | 20 | 80 |
| 3 и 7 | 1 | - 50 | 10 | 70 |
| 4 и 8 | 2 | - 60 | - 20 | 100 |

Для бригад №№ 1-4 L=1 м, для бригад №№ 5-8 L = 0,7 м.

3. Установив указанное в таб. 1 значение скорости движения перемычки, нажмите левую кнопку мыши, когда её маркёр размещён над кнопкой «старт». Значение ЭДС и тока индукции занесите в таблицу 1. Повторите измерения для других значений скорости из таблицы 1.

Таблица 1 B1 = мТл.

| V, м/с | - 10 | - 8 | -6 | - 4 | - 2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ЭДС, В | | | | | | | | | | | |
| I, мА | | | | | | | | | | | |

4. Повторите измерения для двух других значений индукции магнитного поля, выбирая их из таблицы 1. Полученные результаты запишите в таб. 2 и 3.

Таблица 2 B2 = мТл.

| V, м/с | - 10 | - 8 | -6 | - 4 | - 2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ЭДС, В | | | | | | | | | | | |
| I, мА | | | | | | | | | | | |

Таблица 3 B3 = мТл.

| V, м/с | - 10 | - 8 | -6 | - 4 | - 2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ЭДС, В | | | | | | | | | | | |
| I, мА | | | | | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:

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

**Вывод по графику**. Полученный экспериментально график зависимости тока индукции от скорости движения перемычки имеет вид прямой, проходящей через начало координат и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид:

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле: $tg\varphi_{эксп} = \frac{\Delta i}{\Delta \upsilon}$.

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле $tg\varphi_{теор} = \frac{BL}{R}$.

4. Заполните таблицу результатов измерений.

| Номер измерения | tgφэксп, Ас/м | tgφтеор, Ас/м |
|---|---|---|
| | | |
| | | |
| | | |

5. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений:

Вопросы и задания для самоконтроля

1 Что называется элементарным магнитным потоком?
2. Что называется магнитным потоком?
3. При каких условиях магнитный поток равен нулю?
4. При каких условиях магнитный поток равен произведению индукции магнитного поля на площадь контура?
5. Сформулируйте определение явления электромагнитной индукции.
6. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
7. Дайте определение циркуляции магнитного поля.
8. Запишите закон ЭМИ в расшифрованном виде.
9. Какое поле является вихревым?
10.Что такое ток Фуко?
11.Чем отличается электрическое поле, созданное точечным зарядом, от электрического поля, появляющегося при ЭМИ?
12.Сформулируйте закон ЭМИ для замкнутого проводящего контура.
13.При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
14.С формулируйте определение явления самоиндукции.
15.Сформулируйте словами закон самоиндукции.
16.Назовите все способы создания переменного магнитного потока.
17.Как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
18.Как выглядит поверхность, через которую формируется переменный магнитный поток в данной работе?
19.Какова зависимость магнитного потока от времени в данной работе?
20.Как направлен вектор магнитной индукции в данной работе?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8**

# МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

(«Механические колебания и волны»,
«Свободные колебания. Груз на пружине, маятник»)

Цель работы

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

Краткая теория

**Колебательное движение** – движение, при котором все механические характеристики тела периодически повторяются.

**Период** $T$ - минимальное время, через которое положение тела полностью повторяется.

**Гармоническое колебательное движение** - движение, при котором координата тела меняется со временем по закону синуса или косинуса

$A=A_0 cos(\omega t+\varphi_0)$

**Основными** характеристиками гармонических колебаний являются:

**Амплитуда** $A_0$ – максимальное значение параметра $A$.

**Угловая частота** собственных колебаний $\omega_0$ - в $2\pi$ раз большая циклической или линейной частоты $\nu = 1/T$ ($\nu$ - число полных колебаний за единицу времени).

**Фаза** $(\omega t+\varphi_0)$ – значение аргумента гармонической функции.

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

**Дифференциальное уравнение** свободных гармонических колебаний параметра A

$$\frac{d^2A}{dt^2}+\omega_0{}^2A=0,$$

свободных затухающих колебаний

$$\frac{d^2A}{dt^2}+2\beta\frac{dA}{dt}+\omega_0{}^2A=0$$

где $\beta$ - коэффициент затухания.

Методика и порядок измерений

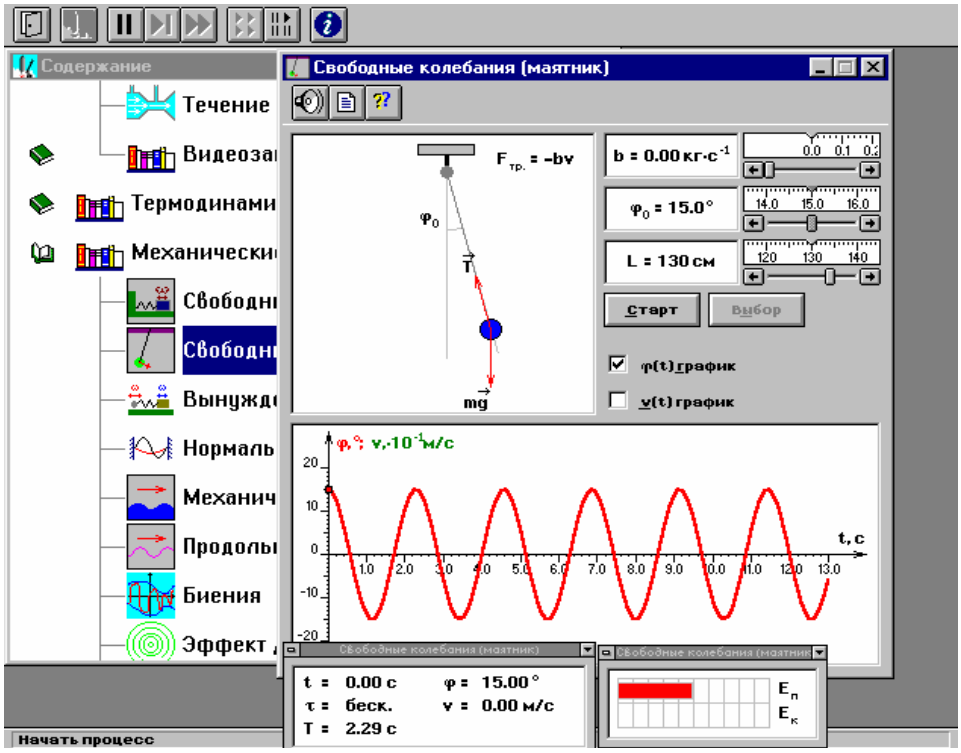
Внимательно рассмотрите рисунки, найдите все регуляторы и другие основные элементы. Зарисуйте поле движения тела с регуляторами соответствующих параметров (укажите, что они регулируют).

Эксперимент 1

Выберите «Маятник». Установите с помощью движков регуляторов максимальную длину нити $L$ и значения коэффициента затухания и начального угла, указанные в табл. 1 для вашей бригады.

Таблица 1. значения коэффициентов затухания (вязкого трения), начального угла отклонения (для первого эксперимента) и начального отклонения (для второго).

| № бр. | b, кг/с | $\varphi_0$, $^0$ | $X_0$, см | m, кг | № бр. | b, кг/с | $\varphi_0$, $^0$ | $X_0$, см | m, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,4 | 20 | 20 | 0,5 | 1 | 0,08 | 14 | 19 | 0,7 |
| 2 | 0,3 | 18 | 18 | 0,6 | 2 | 0,07 | 16 | 18 | 0,8 |
| 3 | 0,2 | 16 | 16 | 0,7 | 3 | 0,06 | 18 | 17 | 0,9 |
| 4 | 0,1 | 14 | 14 | 0,8 | 4 | 0,05 | 20 | 16 | 1,0 |




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

Приступайте к измерениям длительности $\Delta t$ для $N$ =3 полных колебаний, начиная с максимальной длины (150 см) нити маятника и уменьшая ее каждый раз на 10 см (до минимальной длины 80 см). Длину нити $L$ и результаты измерений длительности $\Delta t$ записывайте в таблицу 2.

Таблица 2

| № измерения | N=3 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | L, м | Δt. с | T, с | $T^2$, $с^2$ |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| g , $м/с^2$ | | | | |

1.Вычислите требуемые величины и заполните таблицу 2.

2.Постройте график зависимости квадрата периода колебаний от длины нити математического маятника

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

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

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

4. Оцените абсолютную ошибку определения $g$:

ОТВЕТ: По результатам измерений и асчётов получено значение _____ , равное

$$g = (\quad \pm \quad) \frac{м}{с^2}$$

_____

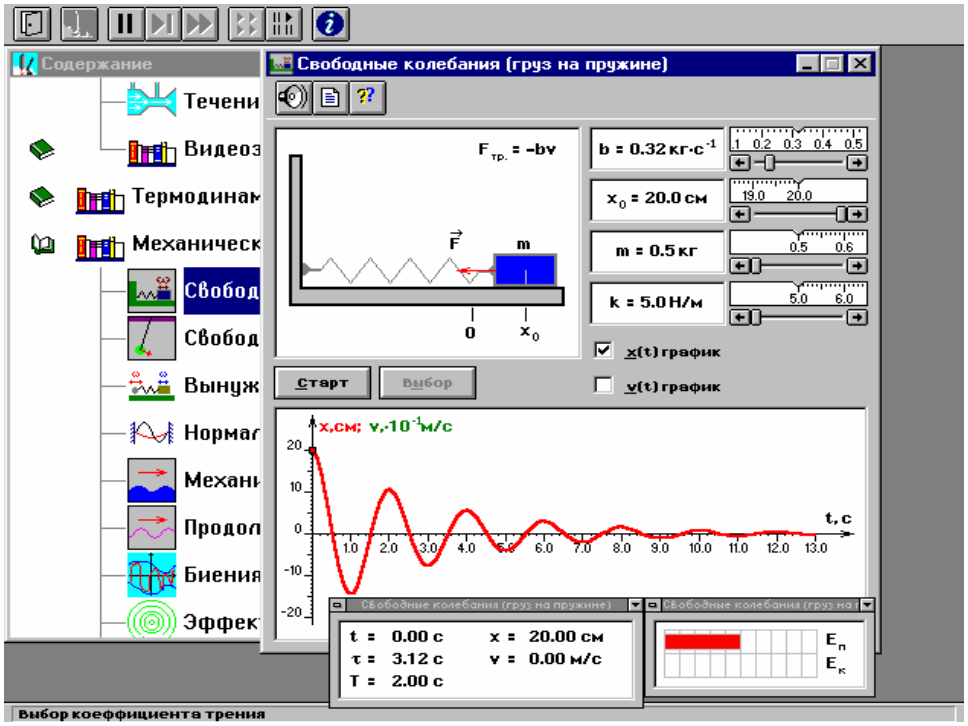
_____

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ: полученное экспериментально значение величины_____ ,

равное _____ с точностью до ошибки измерений, составляющей _____ , совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным

Эксперимент 2

Выберите «Груз на пружине». Установите массу груза, значение коэффициента затухания и начальное смещение, указанные в таблице. 1 для вашей бригады.




Проведите измерения, аналогичные эксперименту 1, уменьшая коэффициент жесткости k каждый раз на 1 Н/м.

Результаты измерений запишите в табл. 3

Таблица 3

| № измерения | N=3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | k, Н/м | Δt. с | T, с | ω, 1/с | $\omega^2$, $1/с^2$ |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| m, кг | | | | | |

5.Вычислите требуемые величины и заполните таблицу 3.

6. Постройте график зависимости квадрата циклической частоты колебаний от жесткости пружины пружинного маятника.

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

7.По наклону графика $\omega^2 = f(k)$ определите значение *m* используя формулу

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

8. Определите абсолютную ошибку определения *m*.

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчётов получено значение _____ , равное

$$m = (\quad \pm \quad) \text{ кг}$$

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ: полученное экспериментально значение величины_____ ,

равное _____ с точностью до ошибки измерений, составляющей _____ , совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным

5.Проанализируйте ответ и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое колебательное движение?
2. Дайте определение периода колебаний.
3. Дайте определение частоты колебаний.
4. Дайте определение гармонических колебаний.
5. Запишите закон зависимости от времени характеристики $A$, совершающей гармоническое колебательное изменение.
6. Запишите закон движения материальной точки, совершающей гармонические колебания.
7. Дайте определение амплитуды гармонических колебаний.
8. Дайте определение фазы гармонических колебаний.
9. Дайте определение начальной фазы гармонических колебаний.
10. Напишите уравнение связи частоты и периода гармонических колебаний.
11. Напишите уравнение связи частоты и циклической частоты гармонических колебаний.
12. Напишите формулу зависимости скорости материальной точки от времени при гармонических колебаниях.
13. Напишите уравнения связи амплитуды скорости и амплитуды смещения при гармонических колебаниях материальной точки.
14. Напишите формулу зависимости ускорения материальной точки от времени при гармонических колебаниях.
15. Напишите уравнения связи амплитуды скорости и амплитуды ускорения при гармонических колебаниях материальной точки.
16. Напишите уравнения связи амплитуды смещения и амплитуды ускорения при гармонических колебаниях материальной точки.
17. Напишите дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний материальной точки.
18. Напишите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний материальной точки.
19. Что определяет коэффициент затухания?
20. Дайте определение математического маятника.
21. Запишите формулу циклической частоты свободных колебаний математического маятника.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9**

# СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

(«Электричество и магнетизм», «Свободные колебания в RLC контуре»)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ;

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

НАПРЯЖЕНИЕ НА КОНДЕНСАТОРЕ $U = \frac{q}{C}$

ЭДС самоиндукции в катушке $\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$

НАПРЯЖЕНИЕ НА РЕЗИСТОРЕ $U_R = IR$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА $I = \frac{dq}{dt}$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ свободных незатухающих колебаний

$\frac{d^2q}{dt^2} + {\omega_0}^2 q = 0$ где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА контура .

ПЕРИОД $T = 2\pi\sqrt{LC}$

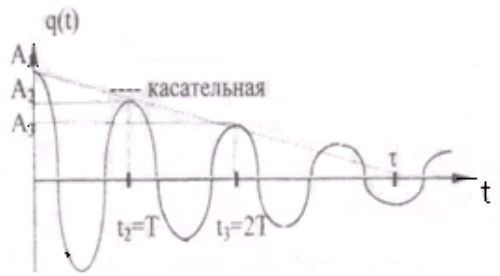
Его решение $q(t) = q_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \alpha)$ где α - начальная фаза.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ свободных затухающих колебаний

, $\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta\frac{dq}{dt} + {\omega_0}^2 q = 0$ где $\beta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания.

Его решение $q(t) = q_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \alpha)$ , где $\omega = \sqrt{{\omega_0}^2 - \beta^2}$ - частота затухающих колебаний.

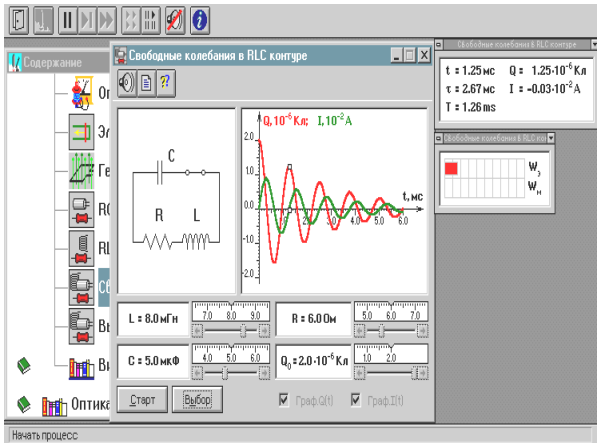
ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ в контуре $\tau$ -есть время, за которое амплитуда




колебаний уменьшается в e = 2.73 раз. На графике зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени касательная, проведенная к этому графику в начальный момент времени, пересекает ось времени в точке t = $\tau$. ЛОГАРИФМИЧЕСКИМ ДЕКРЕМЕНТНОМ ЗАТУХАНИЯ

называется величина, определяемая формулой $\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$. ДОБРОТНОСТЬ контура равна $Q = \frac{\pi}{\lambda}$.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:




1. Нажмите мышью кнопку «Выбор». Подведите маркер мыши к движку регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину емкости конденсатора и установите числовое значение, равное взятому из таблицы 1 для вашей бригады. Аналогичным способом установите величину индуктивности в соответствии с таблицей 1.

**Таблица I. Значения емкости конденсатора и индуктивности катушки**

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C [мкФ] | 3 | 3 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 2.4 | 2 | 2 |
| L[мгн] | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 9 | 8 | 7 |

2. Установите сопротивления резистора R = 1 Ом. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте график зависимости заряда конденсатора от времени. Измерьте линейкой значения первых шести амплитуд и запишите их в таблицу 2. Меняя сопротивление R, повторите измерения амплитуд и заполните таблицу 2.

**Таблица 2. Результаты измерений при C =____ мкФ, L = ____мГн, T =____ мс.**

| R, Ом | A1, мм | A2, мм | A3, мм | A4, мм | A5, мм | A6, мм | τ, мс | β, с-1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | |
| t[мс] | | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

1. Рассчитайте значения периода колебаний и запишите в заголовке табл. 2.
2.Рассчитайте время t, при котором измерена соответствующая амплитуда и запишите в таблицу2.
3.Постройте на одном чертеже графики экспериментальных зависимостей амплитуды колебания A от времени t (6 линий, соответствующих разным R).

4. Для каждого графика постройте касательную к нему в начальный момент времени. Продолжив касательную до пересечения с осью времени, определи те экспериментальное значение постоянной времени затухания $\tau$, и запишите в таблицу 2.

5. Рассчитайте величины коэффициента затухания $\beta = 1/\tau$ и также внесите в таблицу 2.

6. Постройте график зависимости коэффициента затухания от сопротивления резистора.

**Вывод по графику**: Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид _____ и качественно _____ с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

7.По графику зависимости $\beta(R)$ определите индуктивность контура, используя формулу

$$L = \frac{1}{2}\frac{\Delta R}{\Delta \beta}.$$

8.Оцените погрешность:

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

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое колебательный контур?

2. Каковы электрические характеристики резистора, конденсатора, катушки?

3. Дайте определение гармонических колебаний. Что такое период колебания?

5. Какая физическая величина испытывает колебания в колебательном контуре?

6. Напишите формулу для напряжения на конденсаторе.

7. Напишите формулу для напряжения на катушке индуктивности. Какое другое название она имеет?

8. Напишите формулу для напряжения на резисторе. Какое другое название она имеет?

9. Какие законы выполняются для тока и напряжения на отдельных элементах в колебательном контуре?

10.Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электромагнитной индукции в общем виде.

11.Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электромагнитной индукции для проводящего контура.

12.Сформулируйте и запишите в виде формулы закон самоиндукции.

13.Запищите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные гармонические колебания.

14.Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные затухающие колебания.

15.Напишите формулу циклической частоты свободных гармонических колебаний в контуре.

16.Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных гармонических колебаниях в контуре.

17.Напишите формулу циклической частоты свободных затухающих колебаний в контуре.

18.Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных затухающих колебаниях в контуре.

19.Напишите формулу для коэффициента затухания.

20.Дайте определение постоянной времени затухания.

21 .Напишите формулу логарифмического декремента затухания. Что он характеризует?

22.Напишите формулу связи логарифмического декремента затухания с коэффициентом затухания. Напишите формулу для добротности контура. Что определяет добротность?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10**

# ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ОПЫТ ЮНГА

(«Оптика», «Интерференционный опыт Юнга»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

•Знакомство с моделированием процесса сложения когерентных электромагнитных волн.

•Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн от двух источников (щелей).

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

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

КОГЕРЕНТНОСТЬЮ называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

КОГЕРЕНТНЫМИ называются волны, для которых разность фаз возбуждаемых ими колебаний остается постоянной во времени. Когерентными являются гармонические волны с кратными частотами.

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

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

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

ЗОНАМИ ФРЕНЕЛЯ называются такие участки на поверхности волнового фронта, для которых излучение от двух соседних участков при сложении дает практически нулевой (минимальный) результат (излучение от двух соседних зон Френеля компенсируется). Расстояния от краев каждой зоны до точки наблюдения отличаются на $\lambda/2$.

Величина напряженности электрического поля dE электромагнитной волны (ЭМВ), излучаемой элементарным участком площадью dS волновой поверхности в точке наблюдения, расположенной на расстоянии r от этого участка, равна $dE = K\frac{a_0 dS}{r}\cos(\omega t - kr + \alpha_0)$, где множитель $a_0$ определяется амплитудой светового колебания в том месте, где расположена площадка dS, коэффициент K зависит от угла между нормалью к площадке dS и направлением на точку наблюдения, $k=2\pi/\lambda$ - волновое число:

Аналогичная формула будет справедлива для любого точечного источника гармонической волны.

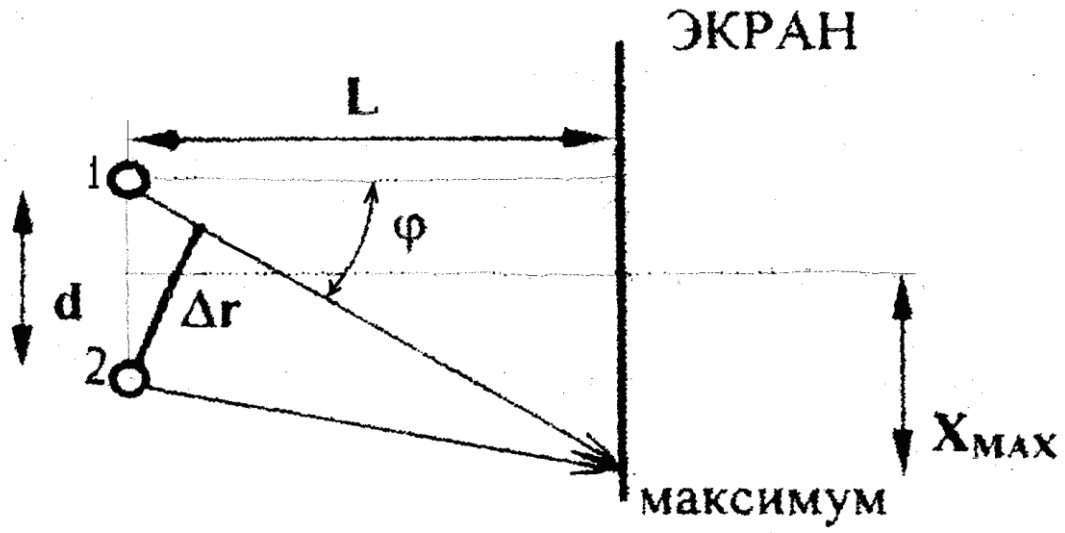
Для двух точечных источников (см. рисунок), расположенных на расстоянии d друг от друга на линии, параллельной экрану, отстоящему от линии источников (1 и 2) на расстоянии L, максимум при интерференции волн на экране наблюдается при условии, что разность хода $\Delta r$ волн, приходящих в данную точку, кратна длине волны: $\Delta r = m\lambda$, (m - 0,1,2,...).

Формула связи $d\sin(\varphi) = m\lambda$ для первого максимума и при большом расстоянии до экрана L>>d когда

$$\sin(\varphi) \approx tg(\varphi) \approx \frac{X_{\max}}{L}$$

преобразуется так:

$$\frac{X_{\max}{}^{d}}{L} = \lambda \text{ откуда } X_{MAX} = \lambda L\frac{1}{d}$$




**МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**

1.Подведите маркер мыши к движку регулятора вблизи картинки спектра, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, двигайте движок, установив числовое значение длины волны $\lambda_1$, взятое из таблицы 1 для вашей бригады. Расстояние L=4 м.

Таблица 1. Примерные значения длины волны (в нм)

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

2.Аналогичным образов, зацепив мышью движок регулятора расстояния между щелями, установите минимальное значение d = 1 мм. Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние $X_{max}$ между нулевым и первым максимумами и запишите в таблицу 2.

Увеличивая d каждый раз на 0.3 мм, измерьте еще 9 значений расстояния Хмах.

3.Устанавливая новые числовые значения длины волны λ, из таблицы 1 для вашей бригады, повторите измерения по п.2, записывая результаты в таблицы 3,4,5

Таблица 2-5. Результаты измерений при $\lambda_1$= нм. $\lambda_1 L_{теор}$=

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d,(мм) | | | | | | | | |
| $X_{MAX,}$(мм) | | | | | | | | |
| 1/d ($мм^{-1}$) | | | | | | | | |

Результаты измерений при $\lambda_2$= нм. $\lambda_2 L_{теор}$=

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d,(мм) | | | | | | | | |
| $X_{MAX,}$(мм) | | | | | | | | |
| 1/d ($мм^{-1}$) | | | | | | | | |

Результаты измерений при $\lambda_3$= нм. $\lambda_3 L_{теор}$=

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d,(мм) | | | | | | | | |
| $X_{MAX,}$(мм) | | | | | | | | |
| 1/d (мм$^{-1}$) | | | | | | | | |

Результаты измерений при $\lambda_4$= нм. $\lambda_4 L_{теор}$=

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d,(мм) | | | | | | | | |
| $X_{MAX,}$(мм) | | | | | | | | |
| 1/d (мм$^{-1}$) | | | | | | | | |

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

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

2.Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей смещения первого максимума *Хмах* от обратного расстояния между щелями (указав на них длину волны λ*).*

**Вывод по графику**:

Полученные экспериментально графики зависимостей смещения первого максимума $X_{max}$ от обратного расстояния между щелями имеют вид и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющих вид

3. Для каждой линии определите по графику экспериментальное значение произведения λL, используя формулу $\lambda_1 L = \frac{\Delta(X_{max})}{\Delta\left(\frac{1}{d}\right)} =$

4.Рассчитайте абсолютную ошибку измерений данного произведения.

**Ответ:** По результатам измерений и расчётов получено значение произведения λL, равное

$\lambda_1 L_{эксп}$ = (  ±  )·10 м, $\lambda_2 L_{эксп}$ =(  ±  )·10 м,

$\lambda_3 L_{эксп}$ = (  ±  )·10 м, $\lambda_4 L_{эксп}$ = (  ±  )·10 м,

**Вывод по ответу:**

Полученное экспериментально значение величины произведения $\lambda_1 L$, равное с точностью до ошибки измерения, составляющей совпадает (не совпадает) с теоретическим значением данной величины, равной

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое волна?
2. Что такое гармоническая волна?
3. Что такое длина волны?
4. Напишите математическое условие того, что функция f(x,t) описывает волну.
5. Что определяет форму волны и направление ее распространения?
6. Напишите математическую функцию, определяющую одномерную гармоническую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси OX.
7. Что такое когерентность?
8. Дайте определение когерентных волн.
9, Дайте определение явления интерференции.
10.Дайте определение явления дифракции.
11. Что такое волновая поверхность?
12.Сформулируйте принцип Гюйгенса.
13.Дайте определение зон Френеля.
14.Напишите формулу для напряженности электрического поля dE электромагнитной волны (ЭМВ), излучаемой элементарным участком площадью $dS$ волновой поверхности в точке наблюдения, расположенной на расстоянии r от этого участка. Поясните рисунком.
15.Что такое разность хода двух гармонических волн, излучаемых двумя источниками.
16:При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается максимум?
17.При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается минимум?

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М: Высшая школа, 2001, Гл. 22, §171-173.
2. Детлаф Д.А., Яворский Б.М. Курс физики. М-: Высшая школа, 2000, Гл 31, §31.1 – 31.3.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11**

# Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

(«Оптика», «Кольца Ньютона»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

•Знакомство с моделированием явления интерференции света в тонких плёнках.

• Изучение интерференции полос равной толщины в схеме колец Ньютона.

• Определение радиуса кривизны линзы.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются при отражении света от воздушного зазора, образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис.1).

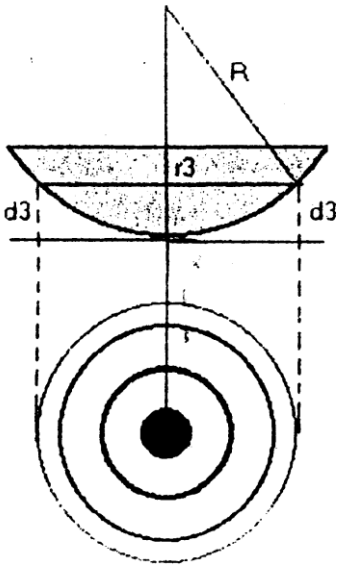



Рис.1

Если на линзу падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, будут интерферировать между собой. При этом образуются интерференционные полосы, имеющие форму концентрических светлых и тёмных колец убывающей ширины. В отражённом свете оптическая разность хода с учётом потери полуволны будет равна

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

где d- толщина воздушного зазора. Из рис. 1 следует, что

$$r^2 = R^2 - (R-d)^2 = 2Rd - d^2 \quad (2)$$

Учитывая, что *ct* является величиной второго порядка малости, то из (2) получим

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad (3)$$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

В точках, для которых оптическая разность хода равна

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

возникают тёмные кольца. Из формул (4) и (5) радиус k-ого тёмного кольца будет равен

$$r^2 = kR\lambda \quad (6)$$

Формула (6) позволяет определить радиус кривизны линзы

$$R = \frac{r^2}{k\lambda}$$

Вследствие деформации стекла, а также наличия на стекле пылинок невозможно добиться плотного примыкания линзы и пластины в одной точке. Поэтому при определении радиуса кривизны линзы пользуются другой формулой, в которую входит комбинация из двух значений радиусов интерференционных колец $r_m$ и $r_n$, что позволяет исключить возможный зазор в точке контакта линзы и стеклянной пластины:

$$R = \frac{r^2{}_m - r_n^2}{(m-n)\lambda} \qquad (7)$$

## Методика и порядок измерений

1. Зацепив мышью движок регулятора длины волны монохроматического света и установите первое значение длины волны из таблицы 1 для вашей бригады. Аналогичным образом установите первое значение радиуса кривизны линзы R

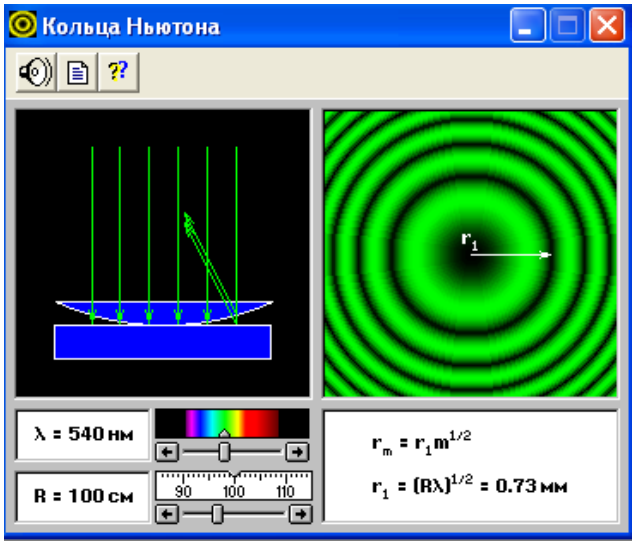



Таблица 1.Значение длины волны и радиуса кривизны линзы.

| Бригада | $\lambda_1$ (нм) | $\lambda_2$ (нм) | $R_1$ (см) | $R_2$ (см) |
|---|---|---|---|---|
| 1,5 | 400 | 640 | 50 | 180 |
| 2,6 | 460 | 680 | 70 | 160 |
| 3,7 | 520 | 730 | 90 | 140 |
| 4,8 | 560 | 760 | 110 | 120 |

2. По формуле $r_m = r_1 m^{\frac{1}{2}}$ и указанному значению $r_1$ в правом нижнем прямоугольнике окна опыта рассчитайте значение радиусов3,4,5, и 6-го тёмных колец Ньютона и запишите эти значения в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов.

| $\lambda_1$= нм, $R_1$ = см | | | | $\lambda_2$ = нм, $R_2$ = см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $r_3$ (мм) | $r_5$ (мм) | $r_4$ (мм) | $r_6$ (мм) | $r_3$ (мм) | $r_5$ (мм) | $r_4$ (мм) | $r_6$ (мм) |
| | | | | | | | |
| $R_1$ = (м) | | $R_1^*$ = (м) | | $R_2$ = (м) | | $R_2^*$ = (м) | |

3. По формуле (7) для $m_1$=3 и $n_1$=5, $m_2$=4 и $n_2$=6 рассчитайте радиусы кривизны линзы $R_1$ и $R_1^*$ и запишите значения в таблицу 2.

4. Установите мышью второе значения радиуса кривизны линзы и длины волны из таблицы 1 и выполните измерения п.п. 3 и 4.

5. Проанализируйте полученные результаты и оцените погрешность проведённых измерений.

**Ответ:** По результатам измерений и расчётов получены значения радиусов кривизны линз, равные

$R_1=($ ± $)$ $R_2=($ ± $)$

**Вывод по ответу**

Полученные экспериментально значения радиусов кривизны линз равные и с точностью до ошибок измерений, составляющих и совпадает (не совпадает) с установленными значениями данных величин и .

**Вопросы и задании для самоконтроля**

!. Что такое полосы равной толщины и равного наклона? Где они локализованы?

2. Проведите расчёт интерференционной картины в тонкой плёнке.

3. Что называется временем когерентности немонохроматической волны?

4. Что называется длиной когерентности?

5. Почему для немонохроматического света число видимых интерференционных колен будет ограниченным? От чего будет зависеть это число?

6. Объясните, почему расстояние между кольцами изменяется с изменением радиуса кривизны линзы при неизменной длине волны?

7. Как изменится картина колеи Ньютона, если воздушный зазор между линзой и пластиной заполнить водой?

8. Почему в отражённом свете в центре наблюдаемся темное кольцо?

9. Как изменится картина колец Ньютона, если наблюдение проводить в проходящем свете?

10. Почему масляное пятно на поверхности жидкости имеет радужную окраску?

11. Объясните, как явление интерференции света в тонких плёнках используется для просветления оптики?

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. VI.: Высшая школа. 200К Гл.22,§174.

2. Детлаф А.А., Яворский В.VI Курс физики. VI.: Высшая школа, 2000, Гл.31. §31.3.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12**

# ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

(«Квантовая физика», «Фотоэффект»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**:

•Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.

•Экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта.

•Экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода фотокатода и постоянной Планка.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**:

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

ЭНЕРГИЯ ФОТОНА $E_{Ф=}\ h\nu$.

$\nu$ - частота излучения, $h$ - постоянная Планка, $h$=6,62·10$^{-34}$ Дж·с. ЭНЕРГИЯ часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-вольтах:

1 эВ=1.6·10$^{-19}$Дж.

МАССА ФОТОНА связана с его энергией соотношением Эйнштейна

$E_ф = m_ф c^2$, отсюда $m_ф = \dfrac{h\nu}{c^2}$

ИМПУЛЬС ФОТОНА $p = m_ф c = \dfrac{h\nu}{c} = \dfrac{h}{\lambda} = \dfrac{E_ф}{c}$, где λ - длина волны ЭМИ.

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ есть явление вылета электронов из вещества (металла, фотокатода) при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например, светом. Вылетевшие электроны называются ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

Кинетическая энергия электрона внутри вещества увеличивается на $h\nu$ но при вылете фотоэлектрона из вещества им совершается работа $A_{вых}$ (работа выхода) против сил электростатического притяжения к металлу. У фотоэлектрона сообщенная ему фотоном порция энергии уменьшается на величину, равную работе выхода из металла (фотокатода), а оставшаяся часть имеет вид кинетической энергии фотоэлектрона вне металла (фотокатода):

$$E_{К.ЭЛ}^{ВНЕ} = h\nu - A_{ВЫХ}$$

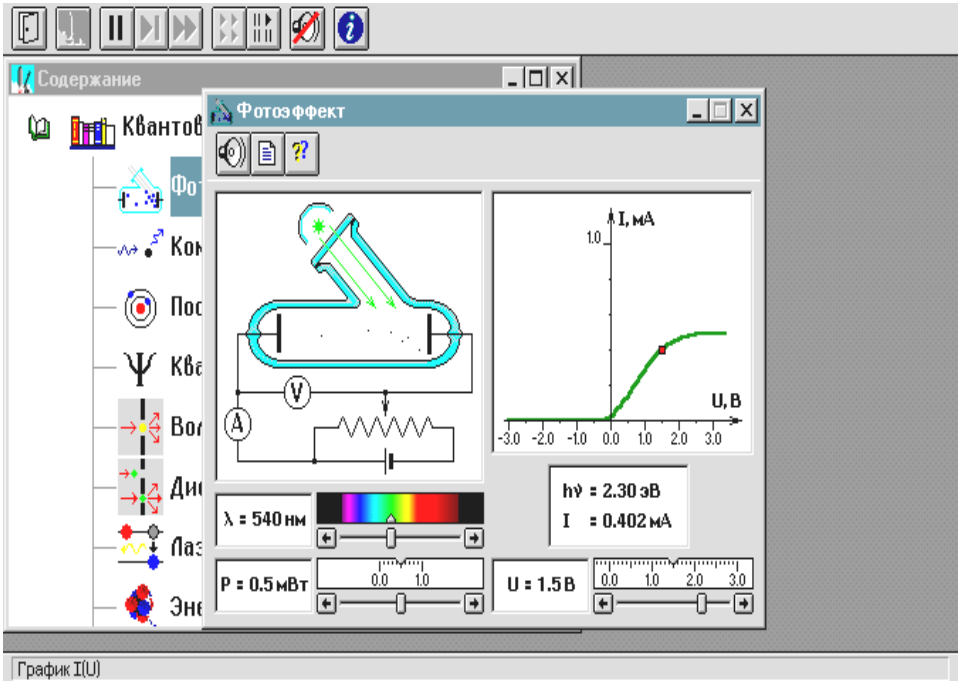
Это соотношение называют формулой (законом) ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА.

КРАСНАЯ ГРАНИЦА фотоэффекта есть *минимальная* частота ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия фотона, равна работе выхода $h\nu_{кр}=A_{вых}$

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

$$U_{ЗАП} = \frac{E_{К\,ЭЛ}^{ВНЕ}}{e} = \frac{h\nu - A_{ВЫХ}}{e}$$

где $e$ - заряд электрона.




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

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

**ИЗМЕРЕНИЯ**:

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

$$\lambda_{кр} =$$

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

3. Сначала установите значение запирающего напряжения в соответствии с таблицей 2.

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

5. Значения λ и Uзап занесите в таблицу 1.

**Таблица 1.** РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

| i = | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Uзап | | | | |
| $\lambda_i$, нм | | | | |
| $1/\lambda_i$, $10^6$ м$^{-1}$ | | | | |

**Таблица 2.** Значения запирающего напряжения

| Бригады | $U_{зап1}$ | $U_{зап2}$ | $U_{зап3}$ | $U_{зап4}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1,5 | -0,1 | -0,3 | -0,6 | -0,8 |
| 2,6 | -0,2 | -0,4 | -0,6 | -0,9 |
| 3,7 | -0,3 | -0,5 | -0,7 | -1,0 |
| 4,8 | -0,4 | -0,7 | -0,8 | -1,1 |

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

1.Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн.

2.Постройте график зависимости напряжения запирания ($U_{ЗАП}$) от обратной длины волны *(1/λ)*.

Вывод по графику:

Полученный экспериментально график зависимости _____от _____имеет вид _____и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющих вид _____

3.Определите постоянную Планка, используя график и формулу

$$h = \frac{e \cdot \Delta(U_{ЗАП})}{c \cdot \Delta(\frac{1}{\lambda})} =$$

Оцените погрешность:

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчётов получено значение _____ , равное

*h = (  ±  )*

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ: полученное экспериментально значение величины_____ , равное с точностью до ошибки измерений, составляющей , совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным

4.Используя длину волны красной границы фотоэффекта, вычислите значение работы выхода материала фотокатода.

Оцените погрешность:

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчётов получено значение _____ , равное

$$A_{вых} = (\quad \pm \quad)$$

ВЫВОД ПО ОТВЕТУ фотокатод может быть изготовлен из следующих материалов:

**ТАБЛИЦА 3.** Значения работы выхода для некоторых материалов

| Материал | Калий | Литий | Платина | Рубидий | Серебро | Цезий | Цинк |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_{вых}$, эВ | 2,2 | 2,3 | 6,3 | 2,1 | 4,7 | 2,0 | 4,0 |

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое фотоны?
2. Назовите все модели электромагнитного излучения.
3. Напишите формулу энергии фотона.
4. Напишите формулу, связывающую энергию фотона и его массу.
5. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
6. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
7. Опишите по шагам, что происходит с фотоном, падающим на границу металла.
8. Опишите по шагам, что происходит со свободным электроном металла, после его взаимодействия с фотоном.
9. Опишите, что происходит с электроном, входящим в состав атома металла, после его взаимодействия с фотоном.
10. Что такое работа выхода? Чья это характеристика?
11. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
12. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
13. Как устроен фотоэлемент?
14. Почему катод фотоэлемента называют фотокатодом?
15. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода.
16. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода ниже потенциала фотокатода?
17. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода выше потенциала фотокатода?
18. Как связана кинетическая энергия электрона у катода с его потенциальной энергией у анода?

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2001.Гл.26, § 202 - 204.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М: Высшая школа, 2000, Гл.36. §36.1 – 36.3

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13**

# ЭФФЕКТ КОМПТОНА

(«Квантовая физика», «Комптоновское рассеяние»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

• Знакомство с моделями электромагнитного излучения и их использованием при анализе процесса рассеяния рентгеновского излучения на веществе.

• Экспериментальное подтверждение закономерностей эффекта Комптона.

• Экспериментальное определение комптоновской длины волны электрона.

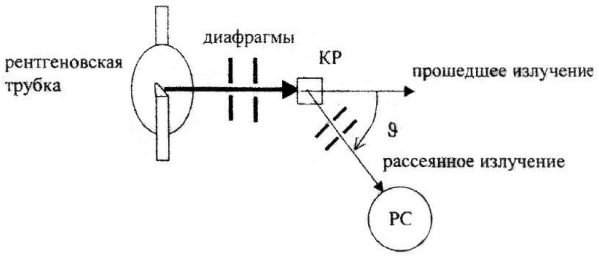
**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

МОДЕЛИ электромагнитного излучения (ЭМИ): луч - линия распространения ЭМИ (геометрическая оптика) волна - гармоническая волна, имеющая амплитуду и определенную длину волны или частоту (волновая оптика), поток частиц (фотонов) используется в квантовой оптике и для объяснения многих эффектов, на которых основана квантовая теория строения вещества. Характеристики всех моделей связаны друг с другом.

ЭФФЕКТОМ КОМПТОНА называется появление рассеянного излучения с большей длиной волны при облучении вещества монохроматическим рентгеновским излучением.

РЕНТГЕНОВСКИМ называется электромагнитное излучение, которое можно моделировать с помощью электромагнитной волны с длиной от $10^{-8}$ до $10^{-12}$ м, или с помощью потока фотонов с энергией от 100 эВ до $10^{6}$ эВ. Первая модель применяется для описания рентгеновского излучения, распространяющегося от источника до вещества. Оно представляется, как монохроматическая волна с длиной $\lambda$.

Волновая модель применяется и для описания рассеянного под углом υ рентгеновского излучения, идущего от вещества (КР) до регистрирующего устройства (рентгеновского спектрометра РС).




электрона до столкновения равна его энергии покоя $mc^2$, где $m$ - масса покоя электрона. Импульс электрона равен 0.

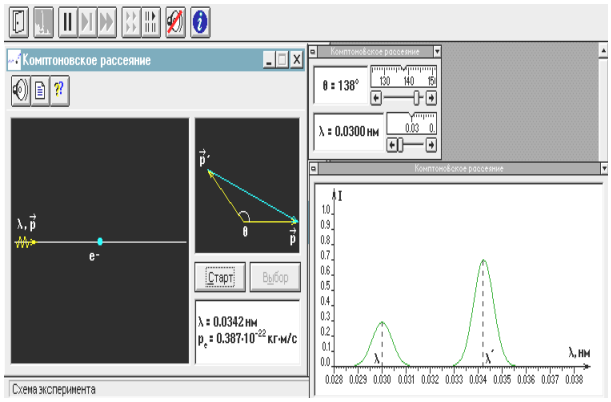
После столкновения электрон будет обладать импульсом $p$ и энергией, равной $c\sqrt{p^2+m^2c^2}$. Энергия фотона станет равной $n\omega$', а импульс $\eta k'$. Из закона сохранения импульса и энергии вытекают два равенства

$$\eta\omega + mc^2 = \eta\omega' + c\sqrt{p^2+m^2c^2} \quad \text{и} \quad \eta k = p + \eta k$$

Разделив первое равенство на второе, возведя в квадрат и проведя некоторые преобразования, получим формулу Комптона:

$\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=\lambda_c(1-\cos\theta)$, где комптоновская длина волны $\lambda_c = \dfrac{h}{mc}$. Для электрона $\lambda_c=2.43\cdot10^{-12}$ м

**МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**




**ИЗМЕРЕНИЯ:**

1. Подведите маркер мыши к движку регулятора длины волны падающего ЭМИ и установите первое значение длины волны из таблицы 2, соответствующее номеру вашей бригады.

2. Подведите маркер мыши к движку регулятора угла приема рассеянного ЭМИ и установите первое значение 60° из таблицы 1.

3. По картине измеренных значений определите длину волны λ' рассеянного ЭМИ и запишите в первую строку таблицы 1.

4. Изменяйте угол наблюдения с шагом 10 , а записывайте измеренные значения λ' в соответствующие строки таблицы 1.

5. Заполнив все строки таблицы 1, измените значение длины волны падающего ЭМИ в соответствии со следующим значением для вашей бригады таблицы 2. Повторите измерения длины волны рассеянного ЭМИ, заполняя сначала таблицу 3, а затем и таблицу 4 (аналогичные таблице 1).

**Таблица 1.** для выбора значений длин волн падающего ЭМИ

| № бригады | Длина волны падающего ЭМИ (пм) | | |
|---|---|---|---|
| 1,5 | 30 | 50 | 70 |
| 2,6 | 35 | 55 | 80 |
| 3,7 | 40 | 60 | 90 |
| 4,8 | 45 | 65 | 100 |

**Таблица 2.** результаты измерений для $\lambda_1$= пм

| № измер. | θ, град | λ' , пм | Δλ, пм | 1-cosθ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 60 | | | |
| 2 | 70 | | | |
| 3 | 80 | | | |
| 4 | 90 | | | |
| 5 | 100 | | | |
| 6 | 110 | | | |
| 7 | 120 | | | |
| 8 | 130 | | | |
| 9 | 140 | | | |
| 10 | 150 | | | |
| 11 | 160 | | | |

**Таблица 3.** результаты измерений для $\lambda_2$= пм

| № измер. | θ, град | λ' , пм | Δλ, пм | 1-cosθ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 60 | | | |
| 2 | 70 | | | |
| 3 | 80 | | | |
| 4 | 90 | | | |
| 5 | 100 | | | |
| 6 | 110 | | | |
| 7 | 120 | | | |
| 8 | 130 | | | |
| 9 | 140 | | | |
| 10 | 150 | | | |
| 11 | 160 | | | |

**Таблица 4.** результаты измерений для $\lambda_3$=  пм

| № измер. | θ, град | λ' , пм | Δλ, пм | 1-cosθ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 60 | | | |
| 2 | 70 | | | |
| 3 | 80 | | | |
| 4 | 90 | | | |
| 5 | 100 | | | |
| 6 | 110 | | | |
| 7 | 120 | | | |
| 8 | 130 | | | |
| 9 | 140 | | | |
| 10 | 150 | | | |
| 11 | 160 | | | |

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

1. Вычислите и запишите в таблицы 2,3 и 4 величины *1-cos θ*, $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda$.

2. Постройте график зависимости изменения длины волны $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda$ от разности *1 - cos θ* для каждой серии измерений.

Вывод по графику : Полученный экспериментально график зависимости изменения длины волны $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda$ *от разности 1 - cos θ* имеет вид  и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид

3. Определите по наклону графика значение комптоновской длины волны электрона.

$$\lambda c = \frac{\Delta(\Delta\lambda)}{\Delta(1 - cos\,\vartheta)} =$$

4. Оцените погрешность измерения:

5. Ответ: По результатам измерений и расчётов получено значение Комптоновской длины волны электрона, равное

$$\lambda_c = (\quad \pm \quad)$$

6. Вывод по ответу: Полученное экспериментально значение величины Комптоновской длины волны электрона, равное с точностью до ошибки измерений, составляющей , совпадает (не совпадает) с табличным значением данной величины, равным 2,426 пм.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Назовите модели, с помощью которых описывается электромагнитное излучение.
2. Назовите области физики в которых используются соответствующие модели ЭМИ.
3. Что такое луч?
4. Что такое гармоническая волна?
5. Сформулируйте связь между характеристикам и ЭМИ в волновой и квантовой моделях.
6. Назовите эффекты, для описания которых надо использовать и волновую и квантовую модели ЭМИ. Проиллюстрируйте один из эффектов.
7. Как моделируется процесс взаимодействия падающего рентгеновского фотона свободного электрона вещества?
8. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона с электроном в эффекте Комптона.
9. Сравните поведение фотонов после взаимодействия с электронами в эффекте Комптона и фотоэффекте.
10. Что такое комптоновская длина волны частицы?
11. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии фотонов на электронах, сильно связанных с ядром атома?
12. Как меняется энергия фотона при его комптоновском рассеянии?
13. Что происходит с электроном после рассеяния на нем фотона?
14. Чем отличается масса от массы покоя? Когда они совпадают?
15. Напишите уравнение для импульса фотона.
16. Напишите формулу для эффекта Комптона.
17. Напишите формулу для комптоновской длины волны электрона.
18. Чему равно максимальное изменение длины волны рассеянного фотона и когда оно наблюдается?

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2001.Гл.26, § 206 - 207.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М: Высшая школа, 2000, Гл.36. §36.5 – 36.6.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

(«Квантовая физика», «Дифракция электронов»)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- Изучение волновых свойств электронов.
- Знакомство с компьютерной моделью дифракции электронов при их рассеянии на одномерной монокристаллической решётке (электронография).
- Определение периода кристаллической решётки «плёнки металла».

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ - рассеяние электронов веществом, при котором из начального пучка частиц возникают дополнительно отклонённые пучки этих частиц. Дифракция электронов может быть объяснена только на основе квантовомеханических представлений о микрочастице (электроне) как о волне. Основные геометрические закономерности дифракции электронов ничем не отличаются от закономерностей дифракции волн других диапазонов. Общим условием дифракции волн любой природы является соизмеримость длины падающей волны с расстоянием между рассеивающими центрами:

$$l<d. \qquad (1)$$

Образование дифракционной картины при рассеянии электронов веществом в квантовой физике интерпретируется как распределение вероятности попадания электрона в различные точки экрана. Прошедший через кристалл электрон в результате взаимодействия с кристаллической решёткой образца отклоняется от первоначального направления движения и попадает в некоторую точку фотопластинки, установленной за кристаллом. При длительной; экспозиции постепенно возникает упорядоченная картина дифракционных максимумов и минимумов в распределении электронов, прошедших через кристалл. Точно предсказать, в какое место фотопластинки попадёт данный, электрон, нельзя, но можно указать вероятность его попадания после рассеяния в ту или иную точку пластинки. Эта вероятность определяется квадратом модуля волновой функции электрона $|\psi(x,y,z,t)|^2$, а дифракционная картина на экране возникает как результат вероятностного процесса.

ЭЛЕКТРОНОГРАФИЯ - метод исследования структуры кристаллических веществ, основанный на дифракционном рассеянии ускоренных электрическим полем электронов. Он применяется для изучения атомной структуры кристаллов, аморфных тел и жидкостей, молекул газов и паров. При прохождении через вещество электроны, обладающие волновыми свойствами, взаимодействуют с атомами, в результате чего образуются дифрагированные пучки, интенсивность и расположение которых связаны с атомной структурой вещества и другими структурными параметрами. Рассеяние электронов определяется электростатическим потенциалом атомов, максимум! которого отвечают положениям атомных ядер.

В основе расчёта элементов кристаллической ячейки и определения симметрии кристалла лежит измерение упорядоченного расположения дифракционных максимумов - точек или пятен («рефлексов») на электронограммах. С волновой точки зрения дифракция электронов полностью эквивалентна дифракции света на дифракционной решётке. Поэтому при рассеянии электронов на кристаллах положение главных максимумов определяется формулой дифракционной решётки:

$$d\sin\vartheta = m\lambda \qquad (2)$$

При малых углах дифракции $\vartheta \approx \dfrac{m\lambda}{d}$. (3)

Если на некотором расстоянии $L$ от решётки поместить фотопластинку, то на ней будет зарегистрирована дифракционная картина в виде узких дифракционных полос - рефлексов, положения которых определяются при малых углах дифракции соотношением

$$x_m \approx L\vartheta \approx \frac{mL\lambda}{x_m} \qquad (4)$$

откуда период кристаллической решетки (межплоскостное расстояние)

$$d \approx \frac{mL\lambda}{x_m}. \qquad (5)$$

**МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИИ:**

1. Нажмите мышью кнопку «Выбор» и, зацепив мышью движок регулятора периода решётки, установите значение $d = 1{,}5 \cdot 10^{-10}$ м

2. Аналогичным образом установите первое значение скорости электронов, указанное в табл. 1 для вашей бригады.

3. Нажмите мышью кнопку «Старт» и наблюдайте движение электронов через одномерную модель дифракционной кристаллической решётки и их регистрацию на фотопластинке.

4.Определите по шкале, расположенной в правой части окна, координаты первых трёх максимумов интенсивности дифракционной картины и запишите эти значения в табл 2.

5. Установите второе значение скорости для вашей бригады и повторите эти измерения ещё раз.

**Таблица 1. Значения скорости электронов**

| № бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $v \cdot 10^7$, м/с | 1,50<br>2,00 | 1,55<br>2,05 | 1,60<br>2,10 | 1,65<br>2,15 | 1,70<br>2,20 | 1,80<br>2,25 | 1,85<br>2,30 | 1,90<br>2,35 |

**Таблица 2. Результаты измерений**

| $V_1$= | $\lambda_1$= | | | | | $V_2$= | | | $\lambda_2$= | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_{max}$ $10^{-2}$ м | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | | | | | | | |
| $d_э$ $10^{-10}$ м | | | | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:

1. Рассчитайте для каждого значения $x_m$ по формуле (5) период дифракционной решётки $d_э$, запишите эти данные в табл.2 и сравните полученное среднее значение с установочным.

2. Проведите оценку погрешности измерений.

Ответ: По результатам измерений и расчётов получено значение периода кристаллической решётки

d = ( ± )

Вывод по ответу: полученное экспериментально значение периода кристаллической решётки, равное с точностью до ошибки измерений, составляющей совпадает (не совпадает) с установленным значением данной величины, равным $d = 1{,}5 \cdot 10^{-10}$ м.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Назовите основные отличия кристаллических тел от аморфных.
2. Что такое кристаллическая решётка?
3. Что такое узлы кристаллической решётки?
4. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
5. Как можно классифицировать кристаллы?
6. Что такое ионная связь?
7. Что такое ковалентная связь?
8. Какие типы кристаллографических систем Вы знаете?
9. Определите основные свойства волн де Бройля.
10. В чём заключается соотношение неопределённостей?
11. Что такое волновая функция и в чём заключается ее статистический смысл?
12. Запишите уравнение Шрёдингера для стационарных состояний.
13. Что такое дифракция микрочастиц?
14. Каковы особенности дифракции на пространственной решётке?
15. Сформулируйте условие Брэгга-Вульфа. Что оно определяет?
16. Кем и когда впервые была доказана возможность дифракции электронов?
17. Какую информацию можно получить из анализа электронограммы?

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2001.Гл.28, § 213.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М: Высшая школа, 2000, Гл.37. §37.1.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15**

# СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

(«Квантовая физика», «Постулаты Бора»)

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

•Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.

•Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.

•Экспериментальное определение постоянной Ридберга.

## КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

$E_n = -\frac{E_i}{n^2}$, где $E_i$ - энергия ионизации атома водорода (13.6 эВ).

АЗИМУТАЛЬНОЕ (ОРБИТАЛЬНОЕ) квантовое число l определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении

$|L| = \eta(l+1)$. Оно принимает целочисленные значения $l$ = 0, 1, 2,... n -1 .

МАГНИТНОЕ квантовое число m1 определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона $L_z$ на направление внешнего магнитного поля $B$. Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, по модулю меньшие или равные $l$. $L_z = \eta m_1$, где $m_1=0, \pm1, \pm2, \ldots, \pm l$.

МАГНИТНОЕ спиновое квантовое число $m_s$ определяет проекцию век-тора собственного момента импульса электрона (СПИНА S) на направление внешнего магнитного поля $B$:

$Sz=\eta m_s$ и принимает только 2 значения: $m_s$= +1/2, -1/2. Для модуля спина

$|S| = \eta\sqrt{S(S+1)}$, где S - спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только одно значение. Например, для электрона S=1/2 (аналогично для протона и нейтрона). Для фотона $S=1$.

ВЫРОЖДЕННЫМИ называются состояния электрона с одинаковой энергией.

КРАТНОСТЬ ВЫРОЖДЕНИЯ равна количеству состояний с одной и той же энергией.

КРАТКАЯ запись состояния электрона в атоме: ЦИФРА, равная главному квантовому числу, и БУКВА, определяющая азимутальное квантовое число:

| Буква | *s* | *p* | *d* | *e* | *f* |
|---|---|---|---|---|---|
| Значение *l* | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

ПРАВИЛО ОТБОРА азимутального квантового числа $\Delta l = \pm 1$. Электрон в атоме может переходить только между состояниями, удовлетворяющему указанному правилу.

СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕРИЕЙ называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии:

| Серия | Лаймана | Бальмера | Пашена | Брэкета |
|---|---|---|---|---|
| Переходы | np→1s | ns→2p<br>nd→2p | nf→3d<br>np→3d | ng→4f<br>nd→4f |

**МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**

1. Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером $n_0$, указанным в таблице 2 для вашей бригады и нажмите левую кнопку мыши.

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

3.Запишите в таблицу 1 величину главного квантового числа $n_0$ для нижнего уровня энергии данной серии, название серии и длины волн отдельных линий.

**Таблица 1.** Выбор начальных условий.

| номер бригады | главное квантовое число нижнего уровня, $n_0$ |
|---|---|
| 1,5 | 1 |
| 2,6 | 2 |
| 3,7 | 1 |
| 4,8 | 2 |

**Таблица 2**. Результаты измерений. $n_0$ =

| № линии | n | $1/n^2$ | $\lambda_i$, нм | $1/\lambda_i$,$нм^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

1. Постройте график зависимости обратной длины волны ($1/\lambda$) от обратного квадрата главного квантового числа ($1/n^2$) для данной спектральной серии.

Вывод по графику. Полученный экспериментально график зависимости обратной длины волны ($1/\lambda$) от обратного квадрата главного квантового числа ($1/n^2$) имеет вид прямой и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид:

2. Определите по наклону графика значение постоянной Ридберга

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

3. Оцените погрешность полученного результата:

Ответ: По результатам измерений и расчётов получено значение постоянной Ридберга равное

R = ( ± )

---

---

6. Вывод по ответу: полученное экспериментально значение постоянной Ридберга, равное с точностью до ошибки измерений, составляющей, совпадает (не совпадает) с табличным значением данной величины, равным $R = 1{,}097 \cdot 10^7$ м$^{-1}$.

6. Вывод по ответу: полученное экспериментально значение постоянной Ридберга, равное с точностью до ошибки измерений, составляющей, совпадает (не совпадает) с

табличным значением данной величины, равным $R = 1{,}097 \cdot 10^7$ м$^{-1}$.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?
2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ?
3. Что является источником линейчатого спектра ЭМИ?
4. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
5. При каких условиях излучается сплошной спектр ЭМИ?
6. Опишите планетарную модель атома.
7. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики фотона и электрона, который излучает данный фотон?
9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.
14. Что определяет главное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
15. Что определяет азимутальное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что определяет магнитное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
17. Что такое спин электрона?
18. Что определяет спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
19. Что определяет магнитное спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
20. Что такое вырожденные состояния?
21. Как определить, кратность вырождения состояния?
22. Расшифруйте краткую запись состояния электрона в атоме ($2s^2$, $2p^3$).
23. Может ли электрон иметь состояние 2d и почему?
24. Сформулируйте правило отбора.
25. Что такое спектральная серия?
26. Назовите названия спектральных серий излучения атомарного водорода. Запишите условия для их возникновения.

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2001.Гл.27, § 208 - 212.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М: Высшая школа, 2000, Гл.38. §38.3 – 36.5.

**Юрий Иванович Григорьев**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
«Физика»
для направления подготовки бакалавра
09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
профиля
«Автоматизированные системы обработки информации и управления»

*Компьютерная верстка – Лаврентьева Т.Н..*
Подписано в печать . Формат 60x84/16.
Бумага писчая. Печать оперативная. Усл. печ.л.4 .
Тираж экз. Заказ № . Цена свободная

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»
Волжский филиал