

УДК

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА
КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА - Филиал ФГБОУ ВО
«Иркутский государственный университет путей сообщения»**

**Л.А. КУЗОВНИКОВА
П.В. НОВИКОВ**

ФИЗИКА

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Для студентов очной формы обучения

Направление подготовки

23.03.01 «Технология транспортных процессов»

**Профиль 1 «Организация перевозок и управление на
транспорте (железнодорожный транспорт)»**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



**Красноярск
2016**

УДК

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА
КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА - Филиал ФГБОУ ВО
«Иркутский государственный университет путей сообщения»**

**Л.А. КУЗОВНИКОВА
П.В. НОВИКОВ**

ФИЗИКА

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Для студентов очной формы обучения

Направление подготовки

23.03.01 «Технология транспортных процессов»

**Профиль 1 «Организация перевозок и управление на
транспорте (железнодорожный транспорт)»**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Красноярск
2016**

Кузовникова Л.А. Физика: Виртуальный лабораторный практикум для студентов очной формы обучения Направление подготовки 23.03.01 «Технология транспортных процессов» Профиль 1 «Организация перевозок и управление на транспорте (железнодорожный транспорт)»: учебное пособие / Л.А. Кузовникова, П.В. Новиков. - Красноярск: Красноярск. КрИЖТ ИрГУПС. - 2016. - 94 с.

Настоящее издание является частью учебно-методического комплекса по дисциплине «Физика».

Предназначается в качестве учебного пособия студентам факультета «Транспортные системы» КрИЖТ ИрГУПС при выполнении лабораторного практикума по физике. Настоящее издание содержит краткие теоретические сведения, методику выполнения виртуальных лабораторных работ по всем разделам дисциплины «Физика» и порядок обработки результатов измерений. Приведены вопросы и задания для самоконтроля. Пособие поможет студентам при самостоятельной подготовке к лабораторным занятиям, выполнении и сдаче лабораторных работ.

Рекомендовано к изданию методическим советом КрИЖТ ИрГУПС
Печатается в авторской редакции

© Л.А. Кузовникова, П.В. Новиков, 2016
© Красноярский институт
железнодорожного транспорта, 2016

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ФИЗИКА	6
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПЕРСОНАЛЬНОГО ОТЧЕТА	8
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ГРАФИКОВ	9
НАПИСАНИЕ ВЫВОДОВ	9
Лабораторная работа № 1.1	
ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ	10
Лабораторная работа № 1.2	
МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА.....	17
Лабораторная работа № 2.1	
АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС	25
Лабораторная работа № 3.1	
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ	33
Лабораторная работа № 3.2	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И К.П.Д. ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ.....	43
Лабораторная работа № 4.1	
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	54
Лабораторная работа № 5.1	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ	62
Лабораторная работа № 6.1	
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ОПЫТ ЮНГА.....	72
Лабораторная работа № 6.2	
ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА.....	81
Список литературы	90
Приложение 1 Справочные данные	91
Приложение 2. Титульный лист отчета	92
Приложение 3. Пример определения физической величины по тангенсу угла наклона графика функции.....	93

ВВЕДЕНИЕ

Данный сборник содержит описания к лабораторным работам, в которых используются компьютерные модели, разработанные фирмой «Физикон».

Для начала работы через кнопку «Пуск» в папке «Программы» выбрать программу «Открытая физика». После чего в появившемся на экране монитора перечне разделов физики выбрать раздел, в котором находится используемая в лабораторной работе компьютерная модель. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, установив ее маркер над названием выбранного раздела. Для запуска необходимой лабораторной работы подведите курсор мыши к её названию на экране монитора и нажмите дважды левую кнопку мыши.

Кнопки вверху появившейся картинки являются служебными. Содержание каждой проявляется, когда маркер мыши располагается над нею в течение 1-2 секунд (без нажатия кнопок мыши). Кнопка с двумя вертикальными чертами «||» служит для остановки эксперимента, а рядом расположенные кнопки «▶|», «▶▶» – соответственно для шага и продолжения работы. Во внутреннем окне открытой Вами компьютерной модели сверху расположены служебные кнопки. Кнопка с изображением страницы служит для вызова теоретических сведений. Перемещать окна можно, зацепив (нажав и удерживая левую кнопку) мышью заголовок окна (имеющий синий фон). Закрытие окна теории обеспечивается нажатием кнопки с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ФИЗИКА

Студенты выполняют лабораторные работы по учебному расписанию в часы занятий своей подгруппы. Каждый студент выполняет свой вариант лабораторной работы, номер которого следует заранее узнать у преподавателя. Опоздавшие к началу занятия или не подготовившиеся студенты могут быть не допущены преподавателем к практической работе. При этом они не освобождаются от занятий, а готовятся к следующей работе или сдают предыдущие. **Студент должен приходить на занятия в лабораторию подготовленным!!!**

Выполнение лабораторных работ состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Самостоятельная (домашняя) подготовка студента.

- а) ознакомление с содержанием лабораторной работы по методическому пособию;
- б) составление **конспекта**, который должен содержать
 - название лабораторной работы;**
 - ее цель, оборудование;**
 - краткое описание теоретической части** (теоретическая часть должна быть краткой и содержать основные положения, законы, лежащие в основе изучаемого физического явления, и рабочую формулу (без вывода) с расшифровкой всех буквенных обозначений);
 - метод измерений и описание установки;**
 - выполненное задание для допуска;**
 - таблицы для записи результатов измерений.**
- в) подготовка к устной беседе с преподавателем по теме работы – ответы на вопросы для допуска.

Этап 2. Допуск к лабораторной установке

- а) Формальным признаком готовности студента к занятию является наличие у него конспекта по предстоящей работе с выполненным заданием для допуска.
- б) Устная беседа с преподавателем о сущности предстоящего исследования (перечень вопросов см. ниже).
- в) Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на титульном листе).

Этап 3. Экспериментальная часть

а) Выполнение наблюдений и измерений опытов в соответствии с методическим руководством и указаниями преподавателя.

б) Заполнение таблиц измерений в отчете о проделанной работе.

Непосредственно во время эксперимента результаты измерений заносятся **ручкой** (не карандашом) **в таблицы в конспекте** (а не на отдельных листах!) в тех единицах, в которых снимаются показания приборов; при этом записываются единицы измерения.

в) Проверка преподавателем таблиц измерений студента.

Полученные результаты представляются преподавателю на подпись сразу по окончании экспериментальной работы (подпись в графе ИЗМЕРЕНИЯ в табличке на титульном листе).

В оставшееся время на занятии студент занимается расчетами, оформляет отчет по лабораторной работе или сдает предыдущие работы.

Этап 4. Обработка полученных результатов

а) Вычисление значений расчетных величин по рабочим формулам (расчеты **подробно** записываются в отчете **после написанной формулы**).

б) Расчет погрешностей измерений и вычислений.

в) Построение графиков исследуемых зависимостей. Графики должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.

г) Расчеты необходимых величин по графикам.

д) Написание вывода по полученным результатам.

Этап 5. Сдача лабораторной работы.

Полностью оформленный отчет по лабораторной работе предъявляется преподавателю на следующем занятии.

Отчет должен быть четким, аккуратным и содержать:

- **конспект** теоретической части (см. выше);
- **таблицы с результатами измерений**, подписанные преподавателем в день выполнения лабораторной работы;
- **обработку результатов всех прямых и косвенных измерений**;
- **расчеты искомых величин и их погрешностей**;
- **графики** (если это необходимо);
- **итоги работы (основные результаты и выводы)**. Выводы должны опираться на анализ выявленных в работе закономерностей, связей между различными физическими величинами, сравнение полученных результатов с теоретическими или табличными.

Этап 6. Защита лабораторной работы

- а) Письменные ответы на **контрольные вопросы** к работе.
- б) Выполнение **Дополнительных заданий** к лабораторной работе.
- в) **Собеседование** с преподавателем об изученных физических явлениях и законах, полученных экспериментальных результатах (коллоквиумы).

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА КО ВСЕМ ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

На данные вопросы студент должен знать ответ для получения допуска для выполнения лабораторной работы.

- Какова цель работы?
- Какое физическое явление изучается в данной работе?
- Какими зависимостями связаны величины, описывающие исследуемое физическое явление?
- Какова последовательность действий при выполнении лабораторной работы?
- Каков ожидаемый результат проводимого эксперимента?

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПЕРСОНАЛЬНОГО ОТЧЕТА

Титульный лист (приложение 2).

Цель работы: (переписать полностью из описания лаб. работы).

Краткая теория (выписать основные формулы, определения, законы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).

Экспериментальная часть (кратко описать метод исследования; нарисовать чертеж (схему) и подписать наименования обозначений).

Порядок выполнения работы (кратко, без подробностей перечислить порядок измерения величин).

Таблицы результатов измерений (каждая таблица оформляется на новой странице с указанием ее названия и номера.).

Расчеты. После каждой таблицы должны присутствовать **подробные расчеты** величин **после написанной формулы** с пояснениями. Все расчеты ведутся в системе СИ. В расчетах **указываются единицы измерения.**

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ГРАФИКОВ

- ✓ график должен быть построен карандашом **на миллиметровой бумаге**, размер не менее половины листа А4;
- ✓ над графиком - полное название графика **словами**;
- ✓ на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, обозначение величин, единицы измерения, 10^N ;
- ✓ масштаб и начало координат выбираются так, чтобы экспериментальные точки располагались по всей площади рисунка;
- ✓ на каждой оси - **равномерный масштаб** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок);
- ✓ на графике - экспериментальные и теоретические точки **ярко**;
- ✓ форма графика должна соответствовать теоретической зависимости (**не ломаная**);
- ✓ никаких линий и отметок, поясняющих построение точек на графике, наносить нельзя.

НАПИСАНИЕ ВЫВОДОВ

Наиболее сложным для большинства студентов является **написание выводов** по результатам работы. Рекомендуется:

1. Проанализировать **ожидаемые результаты работы**: что должно получиться по теории.
2. Проанализировать **реально полученные результаты**, указать сходства и различия теоретических и практических результатов.
3. **Обосновать** отмеченные **сходства и различия** в результатах: почему так получилось.

Лабораторная работа № 1.1

ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Механика», работа «Свободное падение тел». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение ускорения свободного падения на поверхности Земли.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим движение тела, брошенного со скоростью V_0 под углом α к горизонту (рис.1). Если пренебречь силой сопротивления воздуха, то на тело будет действовать только сила тяжести. Это движение можно разложить на два независимых простых движения: движение по вертикали вдоль оси Y и движение по горизонтали вдоль оси X . Участвуя одновременно в этих двух движениях, тело будет перемещаться по траектории, которую мы наблюдаем на практике.

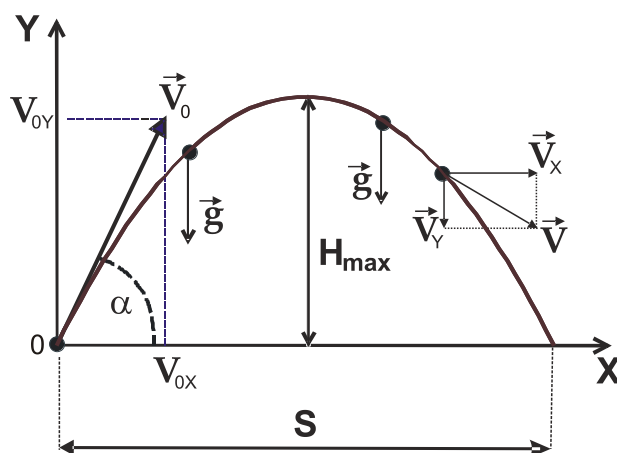


Рисунок 1.

Спроектируем вектор начальной скорости V_0 на оси координат:

$$V_{0x} = V_0 \cos \alpha$$

$$V_{0y} = V_0 \sin \alpha$$

Движение тела вдоль оси Y равнопеременное с ускорением g , которое направлено вертикально вниз.

Движение тела вдоль оси X равномерное, так как проекция ускорения свободного падения на эту ось равна нулю, а сопротивлением воздуха можно пренебречь. Поэтому скорость тела вдоль этого направления не меняется:

$$V_X = \text{const} = V_{0X}.$$

Каждое из двух движений описывается системой двух уравнений: уравнением пути и уравнением скорости.

Для движения вдоль оси Y (вверх)

$$Y = V_{0Y}t - \frac{gt^2}{2}$$

$$V_Y = V_{0Y} - gt$$

Для движения вдоль оси X

$$X = V_{0X}t$$

$$V_X = V_{0X} = \text{const}$$

1. Найдем **уравнение траектории**, по которой движется тело. С этой целью для уравнений X и Y исключим время **t**. Тогда получим уравнение

$$Y = \text{tg}\alpha \cdot X - \frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot X^2 \quad (1)$$

Это уравнение параболы. Траектория движения тела - парабола.

2. Найдем **время подъема** t_n тела на максимальную высоту и **максимальную высоту** подъема $H_{\max}$. При подъеме вверх вдоль оси Y тело уменьшает свою скорость и, достигнув максимальной высоты, останавливается. Следовательно, в верхней точке траектории вертикальная составляющая скорости обращается в нуль:

$$V_Y = V_{0Y} - gt_n = 0, \quad (2)$$

где t_n - время подъема тела на максимальную высоту. Отсюда

$$t_n = \frac{V_0 \sin \alpha}{g} \quad (3)$$

$$H_{\max} = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (4)$$

3. Найдем **дальность полета** S . В силу симметрии траектории время подъема на максимальную высоту и время падения с этой высоты равны между собой. Поэтому для времени всего движения тела получаем:

$$t_{\text{полное}} = 2t_n = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g} \quad (5)$$

Дальность полета S - это перемещение вдоль оси X за все время движения:

$$S = V_{0X} \cdot t = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad (6)$$

4. Скорость в любой заданный момент времени t_1 определяется по теореме Пифагора:

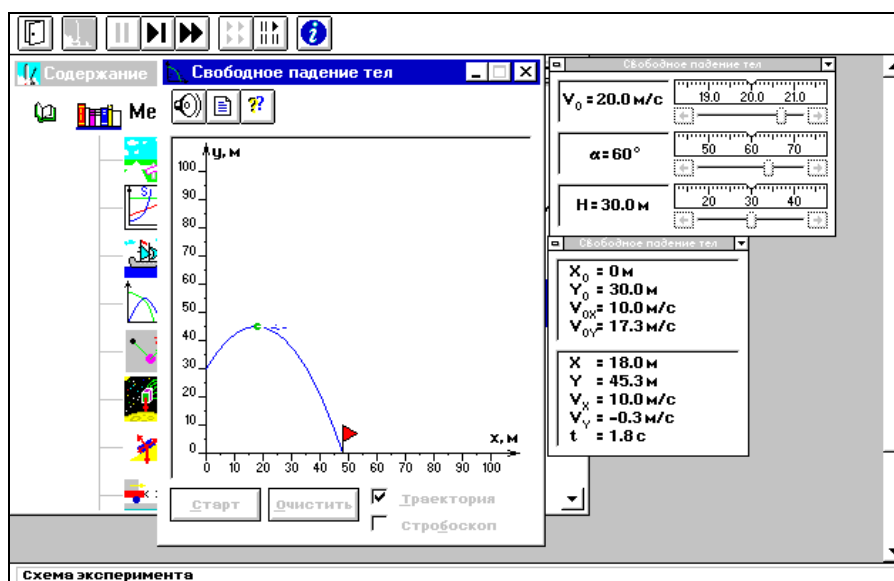
$$\vec{V} = \vec{V}_X + \vec{V}_Y, \quad V = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \quad (7)$$

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ДОПУСКА:

1. Выведите формулу (1) траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту.
2. Выведите формулу (4) для максимальной высоты подъема тела.
3. Получите выражение для определения ускорения свободного падения, используя полученные формулы.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Механика» и «Свободное падение тел».
2. Внимательно рассмотрите картинку в средней части монитора. Найдите регуляторы с движками, задающими начальную скорость V_0 , угол бросания α и начальную высоту H . «Стробоскоп» можно включить или выключить, установив маркер мыши на квадрат с меткой и нажав (коротко) на левую кнопку мыши.



3. Подведите маркер мыши к движку регулятора высоты, нажмите и, удерживая левую кнопку мыши, двигайте мышь вправо. Движок регулятора будет двигаться за маркером мыши. Таким способом установите любое значение высоты. Тем же методом, зацепив мышью и двигая движок регулятора или щелкая мышью по стрелке на движке, установите любое значение угла бросания, а затем начальную скорость. Нажмите на кнопку «Старт». Наблюдайте траекторию движения брошенного тела.

4. Для того, чтобы проводить измерения, тело должно двигаться пошагово (на небольшое расстояние при нажатии кнопки мыши). Для этого на мониторе щелкните мышью кнопку «||» в верхнем ряду кнопок. Нажмите клавишу пробела на клавиатуре компьютера. Нажимайте мышью несколько раз кнопку «►|» вверху окна и наблюдайте за движением тела. Чтобы тело продолжило свободное движение, нажмите кнопку «►►».

5. Внимательно рассмотрите нижнее окно справа от рисунка. Определите, каким величинам соответствуют значения X_0 , Y_0 , V_{0x} , V_{0y} , а также X , Y , V_x , V_y , t .

6. **Протестируйте модель** и убедитесь, что модель работает в соответствии с формулами, описывающими движение тела, брошенного под углом α к горизонту. Для этого следует выбрать те значения параметров модели, для которых результат поведения модели является известным или легко просчитывается. Например, вы можете использовать значения параметров, приведенные в таблице ниже.

ТАБЛИЦА для тестирования модели.

№ п	Кинематическая характеристика	Формула для расчета	Характерные точки	Расчетное значение	Результат измерений
1.	Время полета	$t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}$	$\alpha = 90^\circ$ $y_0 = 0 \text{ м}$ $V_0 = 10 \text{ м/с}$	$t =$	$t =$
2.	Дальность полета	$S = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}$	$y_0 = 0 \text{ м}$ $V_0 = 20 \text{ м/с}$ $\alpha_1 = 30^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$	$S_1 =$ $S_2 =$	$S_1 =$ $S_2 =$
3.	Максимальная высота подъема	$h = y_0 + \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$	$V_0 = 20 \text{ м/с}$ $y_0 = 0 \text{ м}$ $\alpha = 90^\circ$	$h_1 =$	$h_1 =$
			$V_0 = 20 \text{ м/с}$ $y_0 = 10 \text{ м}$ $\alpha = 90^\circ$	$h_2 =$	$h_2 =$

7. Убедитесь, что при движении тела:

- горизонтальная составляющая скорости V_x остается постоянной,
- вертикальная составляющая скорости V_y меняется,
- вертикальная составляющая скорости V_y на одной и той же высоте при движении вверх и движении вниз имеет одну и ту же величину. Запишите результаты наблюдений в отчет по работе.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

8. Установите начальные параметры траектории, соответствующие номеру вашего варианта (таблица 1). Установите первое значение скорости бросания V_0 из таблицы 2.

9. Чтобы измерить максимальную высоту подъема тела для этой траектории, на мониторе щелкните мышью кнопку «||» в верхнем ряду кнопок. Нажмите клавишу пробела на клавиатуре компьютера. Нажимайте мышью несколько раз кнопку «▶|» вверху окна и, когда тело будет в верхней точке траектории (вертикальная компонента скорости V_y должна быть равна нулю), запишите результаты измерений координаты максимальной высоты подъема Y_{MAX} в таблицу 2. Нажмите кнопку «▶▶».

10. Установите начальную скорость движения тела для следующей траектории, которая указана в таблице 2.

11. Проведите измерения Y_{MAX} для этой траектории по пункту 9.

12. Повторите действия по пунктам 10 и 11

ТАБЛИЦА 1. Начальные параметры траекторий .

Вариант	Начальная высота H , (м)	Начальный угол α , (град)	Вариант	Начальная высота H , (м)	Начальный угол α , (град)
1	10	60	9	5	45
2	30	25	10	15	40
3	50	30	11	25	50
4	60	35	12	35	55
5	10	45	13	40	30
6	0	70	14	45	35
7	20	75	15	50	60
8	40	63	16	55	50

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_0 , м/с	15	17	18	19	20	21	22	23	24	25
V_0^2 , м ² /с ²										
Y_{MAX} , м										

13. По данным таблицы 2 постройте график зависимости значений вертикальной координаты точки максимального подъема Y_{MAX} (по оси Y) от квадрата начальной скорости V_0^2 (по оси X).

14. Определите по наклону графика (см. приложение №3) значение ускорения свободного падения g , используя формулу, полученную в задании для допуска

$$g = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha) \cdot \frac{\Delta(V_o^2)}{\Delta(Y_{\max})}.$$

15. Сравните полученное значение с теоретическим. Сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что называется механическим движением? Что называется поступательным и вращательным движением?
2. Что такое система отсчета? Назовите составляющие системы отсчета.
3. Что такое радиус-вектор точки?
4. Дайте определения основных кинематических характеристик движения. Какие из них являются векторными величинами?
5. Что называется средним и мгновенным вектором скорости точки? Что называется средним и мгновенным вектором ускорения точки? Как направлены эти вектора?
6. Запишите кинематические уравнения равномерного и равнопеременного движения.
7. Как определить путь, пройденный телом при неравномерном движении?
8. Что характеризуют нормальное и тангенциальное ускорения? Как разложить вектор полного ускорения на нормальную и тангенциальную составляющие?
9. Дайте определения кинематических характеристик вращательного движения.
10. Как направлен вектор элементарного углового перемещения? Как определить направление угловой скорости и углового ускорения?
11. Как связаны между собой линейные и угловые величины?

Выполните следующие дополнительные задания:

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1. Уравнения движения материальной точки имеют вид $x(t) = A + Bt$ и $y(t) = C + Dt - Et^2$, где A, B, C, D, E – коэффициенты, которые задаются для каждого варианта. Время $t_1 = 0$ с, $t_2 = 5$ с, $t = 3$ с.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A (м)	3	2	1	1	2	3	3	2	1	1	2	3	3	2	1	1
B (м/с)	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5

C (м)	1	2	3	3	2	1	1	2	3	3	2	1	1	2	3	3
D (м/с)	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	7	7	7	7
E (м/с²)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2

1) Построить траекторию в координатах **XУ**. Для построения траектории необходимо определить значения **X** и **У** из уравнений движения в интервале времени от $t_1=0c$ до $t_2=5c$ (рекомендуется через 0,5 с) и полученные результаты занести в таблицу.

2) Определить аналитически (то есть по формуле) перемещение $\Delta \vec{r}$ в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$ и указать его на графике траектории.

3) Определить величину мгновенной скорости $|\vec{V}|$ в заданный момент времени **t** и обозначить ее направление на графике в произвольном масштабе.

4) Определить величину полного ускорения $\vec{a}$ в заданный момент времени **t** и обозначить его направление на графике в произвольном масштабе.

5) Определить величину тангенциального a_t и нормального a_n ускорения в заданный момент времени **t** и обозначить их направления на графике в произвольном масштабе.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 2. Уравнение вращательного движения тела имеет вид: $\varphi(t) = At + Bt^2 - Ct^3$, где коэффициенты **A, B, C** задаются для каждого варианта. Время $t_1=0$ с, $t_2=3,5$ с.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A (рад/с)	0,5	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,0	2,5
B (рад/с²)	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	5,5	6,5	6,5	6,5	6,5
C (рад/с³)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,8

1) Построить график $\varphi = \varphi(t)$, т.е. зависимость угла поворота φ от времени **t** в интервале времени от t_1 до t_2 .

2) Определить аналитически угловую скорость ω .

3) Построить график $\omega = \omega(t)$ в интервале времени от t_1 до t_2 .

4) Определить аналитически угловое ускорение ε .

5) Построить график $\varepsilon = \varepsilon(t)$ в интервале времени от t_1 до t_2 .

МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Механика» и «Момент инерции». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальная проверка теоремы Штейнера.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ **Абсолютно твердое тело** - тело, расстояние между любыми двумя точками которого всегда остается неизменным.

Абсолютно твердое тело – это физическая модель. Любое движение твердого тела можно разложить на два основных вида движения – *поступательное* и *вращательное*.

Для характеристики вращательного движения твердого тела, кроме массы и сил, действующих на тело, необходимы физические величины, зависящие от точки приложения силы и от распределения массы тела относительно оси вращения. Такими величинами являются момент инерции I , момент сил $\vec{M}$ и момент импульса $\vec{L}$.

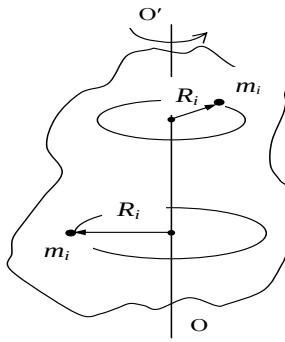
♦ **Момент инерции** I (кг·м²) – мера инертности тел во вращательном движении. Момент инерции зависит от массы тела и распределения массы относительно оси вращения.

Моментом инерции материальной точки относительно неподвижной оси вращения называется величина, равная произведению массы точки на квадрат расстояния от точки до оси вращения:

$$I = mR^2,$$

где R - кратчайшее расстояние от оси вращения до точки, m – масса точки.

Абсолютное твердое тело можно представить как систему N материальных точек массой m_i . Момент инерции тела будет равен сумме моментов инерции этих точек.



Моментом инерции твердого тела относительно оси вращения называется величина, равная сумме произведений элементарных масс на квадраты их расстояний до данной оси

$$I = \sum_{i=1}^N m_i R_i^2.$$

Для твердого тела произвольной формы вычисление момента инерции является сложной задачей.

Наиболее просто вычислить момент инерции твердого тела относительно оси, проходящей через центр масс (центр инерции) тела.

♦ **Центр инерции (центр масс) системы** из N материальных точек – это точка, положение которой задается радиус-вектором:

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + \dots + m_N \vec{r}_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{m},$$

где $m_i, \vec{r}_i$ – масса и радиус-вектор i -ой материальной точки,

$\sum m_i = m$ – масса системы.

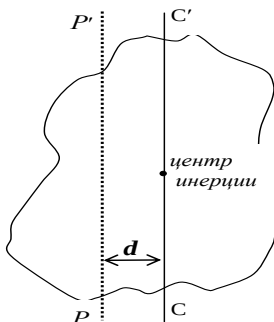
Соответственно, координаты центра масс:

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots + m_N x_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i x_i}{m}$$

$$y_c = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \dots + m_N y_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i y_i}{m}$$

$$z_c = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 + \dots + m_N z_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i z_i}{m}$$

Для определения момента инерции тела относительно любой оси используется теорема Штейнера.

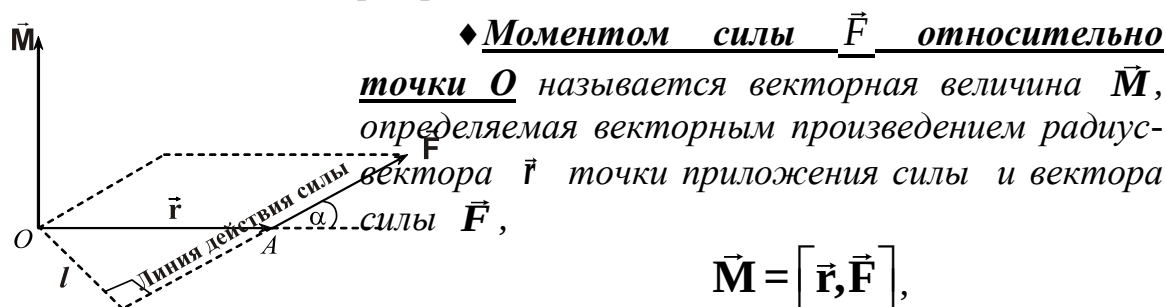


♦ **Теорема Штейнера:**

Момент инерции I_p твердого тела относительно произвольной оси (PP') равен сумме момента инерции I_c относительно оси (CC'), проходящей через центр масс тела параллельно произвольной, и произведения массы тела на квадрат расстояния между осями

$$I_p = I_c + md^2.$$

♦ Момент силы $\vec{M}$ (Н·м) – характеризует силовое взаимодействие тел при вращательном движении.



где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из точки O в точку приложения силы (точка A).

Направление вектора $\vec{M}$ перпендикулярно плоскости, в которой находятся радиус-вектор и вектор силы, и задается правилом правого винта (винт поворачивать от радиус-вектора $\vec{r}$ к вектору силы $\vec{F}$). Моменты сил, вращающие тело против часовой стрелки, считаются положительными, по часовой стрелке – отрицательными.

Величина вектора момента силы равна:

$$M = rF \sin \alpha = Fl,$$

где α – угол между векторами $\vec{r}$ и $\vec{F}$,

$l = r \cdot \sin \alpha$ – плечо силы – кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O (длина перпендикуляра, восстановленного из точки O на прямую, вдоль которой действует сила).

Если на тело действует несколько сил, то момент равнодействующей этих сил относительно некоторой точки равен векторной сумме моментов каждой силы относительно той же точки

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

♦ Момент импульса $\vec{L}$ ($\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$) – мера количества

вращательного движения. Момент импульса материальной точки определяется аналогично моменту силы.

Моментом импульса $\vec{L}$ материальной точки относительно точки O называется векторная величина, определяемая векторным произведением радиус-вектора $\vec{r}$ точки и вектора импульса:

$$\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = m[\vec{r}, \vec{v}],$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из точки O в ту точку, где находится материальная точка,

$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ – импульс точки.

Момент импульса твердого тела относительно оси вращения

$$L = \omega I,$$

где I – момент инерции тела; ω – угловая скорость вращения тела.

♦ **Основной закон динамики (уравнение моментов)**

Скорость изменения момента импульса тела $\vec{L}$ равна действующему моменту силы $\vec{M}$:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

Следствие: Если момент инерции тела не меняется, то

$$M = \frac{d(I\omega)}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow$$

Равнодействующий момент силы $\vec{M}$ равен произведению момента инерции тела I на вызываемое угловое ускорение ε

$$M = I \cdot \varepsilon$$

♦ **Кинетическая энергия при вращательном движении**

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2} \text{ (Дж)}$$

где I – момент инерции тела, ω – его угловая скорость.

Теорема о кинетической энергии: Работа результирующего момента внешних сил равна приращению кинетической энергии вращающегося тела.

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k$$

♦ **Элементарная работа** dA (Дж) вращательного движения равна скалярному произведению момента силы $\vec{M}$ на элементарное угловое перемещение $d\varphi$:

$$dA = (\vec{M} \cdot d\vec{\varphi}).$$

Работа при повороте на конечный угол $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ находится суммированием (интегрированием) всех элементарных работ:

$$A_{12} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M \cdot d\varphi.$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА:

Получите формулы, необходимые для выполнения лабораторной работы, при решении следующей задачи.

Имеется четыре шарика одинаковой массы M , насаженные на невесомый стержень длины L . Координаты шариков относительно центра стержня r_1, r_2, r_3 и r_4 . Сделайте рисунок. Отметьте на нем все необходимые величины.

Получите выражение для координаты центра масс данной системы. Отметьте его на рисунке.

Запишите выражение для расчета момента инерции системы шаров.

Напишите теорему Штейнера для данной системы относительно произвольной оси.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Момент инерции».
2. Внимательно рассмотрите окно опыта. Найдите регуляторы с движками, задающими координаты шариков. Найдите кнопки, задающие положение оси вращения.
3. **Протестируйте модель.** Расположите шарики так, чтобы центр масс системы находился в центре стержня. Для этого, например, установите $r_4 = -r_1$ и $r_3 = -r_2$. Зарисуйте рисунок в отчете. Расположите ось через центр стержня. Рассчитайте момент инерции системы по формуле, полученной в задании для допуска. Сравните расчетное значение момента инерции с модельным, показанном в верхнем окошечке внизу экрана. Переместите ось на край стержня. Рассчитайте момент инерции системы относительно этой оси с помощью теоремы Штейнера. Сравните расчетное значение момента инерции с модельным. Запишите расчеты в отчет.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

ТАБЛИЦА 1. Значения координат.

Вариант	I				II				III			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
1	-50	-30	9	22	-48	-23	15	30	-40	-16	18	28
2	-48	-32	5	18	-44	-28	1	22	-36	-24	10	32
3	-35	-13	3	45	-20	-5	15	34	-28	-11	25	46
4	-44	-24	12	36	-37	-15	23	50	-27	-6	28	49
5	-46	-30	7	20	-42	-26	3	24	-44	-22	12	25
6	-36	-20	-2	45	-25	-4	33	48	-47	-28	16	40
7	-23	-10	18	42	-33	-13	26	39	-50	-35	3	24
8	-22	-16	16	47	-22	-9	16	44	-45	-14	10	21
9	-31	-12	34	50	-24	-3	23	47	-41	5	25	38
10	-30	-16	-1	19	-49	-35	20	28	-33	-6	36	50

11	-29	-15	32	47	-43	-28	3	32	-15	2	16	48
12	-27	-14	28	46	-50	-23	15	37	-22	-9	31	47
13	-40	-26	16	37	-18	-5	32	48	-7	6	27	40
14	-45	-21	-2	19	-50	-26	5	39	-44	-16	4	32
15	-47	-23	14	20	-33	-17	30	46	-20	-8	17	40
16	-32	-10	23	48	-50	2	15	39	-19	-5	28	43

4. Установите первый набор значений координат шариков r_1 , r_2 , r_3 , r_4 , соответствующий номеру Вашего варианта (таблица 1). Зарисуйте расположение шариков.

5. Установите поочередно положение оси ЧЕРЕЗ ЛЕВЫЙ КОНЕЦ, ЧЕРЕЗ ЦЕНТР и ЧЕРЕЗ ПРАВЫЙ КОНЕЦ стержня. Измерьте значения модельных моментов инерции, показываемых в верхнем окошечке внизу экрана. Занесите их в табл. 2 в ячейки "измеренное".

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчетов.

		r_C , м	I_C , кг м ²	d_L , м	I_L , кг м ²	$d_{Ц}$, м	$I_{Ц}$, кг м ²	$d_{П}$, м	$I_{П}$, кг м ²
I	$r_1 =$				измеренное		измеренное		измеренное
	$r_2 =$								
	$r_3 =$				расчетное		расчетное		расчетное
	$r_4 =$								
II	$r_1 =$				измеренное		измеренное		измеренное
	$r_2 =$								
	$r_3 =$				расчетное		расчетное		расчетное
	$r_4 =$								
III	$r_1 =$				измеренное		измеренное		измеренное
	$r_2 =$								
	$r_3 =$				расчетное		расчетное		расчетное
	$r_4 =$								

6. Прodelайте п.п. 4–5 для двух других наборов координат шариков.

7. Для первого набора координат рассчитайте положение центра масс r_C системы. Отметьте его на рисунке. Отметьте на рисунке положение оси, проходящей через центр масс и расстояния R_i от шариков до этой оси. Рассчитайте расстояния R_i от шариков до этой оси. Рассчитайте момент инерции I_C системы шаров относительно оси, проходящей через центр масс. Занесите рассчитанные значения в табл. 2 в ячейки "расчетное".

8. Нарисуйте оси, проходящие через левый край, правый край и центр стержня. Рассчитайте расстояния d_L , $d_{Ц}$, $d_{П}$ от оси, проходящей через центр масс, до осей, проходящих через левый край,

центр и правый край стержня, соответственно. Занесите эти значения в табл.2 и отметьте на рисунке.

9. С помощью теоремы Штейнера, используя формулу, полученную в задании для допуска, рассчитайте моменты инерции системы I_L , I_C , I_P относительно всех трех осей, соответственно. Занесите эти значения в таблицу 2.

10. Сравните значения измеренных моментов инерции с рассчитанными Вами. Сделайте вывод.

11. Прodelайте п.п. 7-9 для двух других наборов координат шариков.

12. Для каждого набора координат постройте график зависимости момента инерции I от квадрата расстояния между осями d^2 . По углу наклона каждого графика определите массу одного шарика:

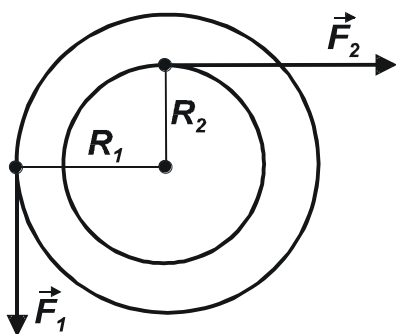
$$M = \frac{1}{4} \frac{\Delta(I)}{\Delta(d^2)}$$

13. Сравните отрезки, отсекаемые графиками по оси Y , со значениями I_C для каждого набора координат шариков. Сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Дайте определение поступательного и вращательного движения твердого тела.
2. Как определить положение центра инерции (центр масс) твердого тела?
3. Объясните физический смысл момента инерции. Чему равен момент инерции материальной точки? системы тел?
4. Сформулируйте теорему Штейнера. Проиллюстрируйте ее рисунком.
5. Что называется моментом силы? Как определить его величину и направление? Что такое плечо силы? Покажите на рисунке.
6. Что такое момент импульса материальной точки? Каковы его величина и направление?
7. Сформулируйте закон сохранения момента импульса системы тел.
8. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения относительно оси вращения.
9. Проведите аналогию между кинематикой и динамикой поступательного и вращательного движения.
10. Что называется плоским движением? Чему равна кинетическая энергия катящегося тела?

Выполните следующее дополнительное задание:



ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1.

На тело, имеющее момент инерции I , действуют две касательные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. При этом $R_1=3\text{м}$ – плечо первой силы, $R_2=2\text{м}$ – второй. Начальная угловая скорость тела ω_0 . Числовые значения момента инерции I , сил F_1 и F_2 , начальной скорости ω_0 задаются для каждого варианта. Время $t_0=0\text{с}$, $t_1=2\text{с}$.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I (\text{кг}\cdot\text{м}^2) =$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$F_1(\text{Н}) =$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$F_2(\text{Н}) =$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$\omega_0 (\text{рад/с})$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	6	7	8	9	10	11

Определить:

- 1) величину и направление результирующего момента сил;
- 2) угловое ускорение ε ;
- 3) угловую скорость ω_1 и угол поворота φ_1 в заданный момент времени t_1 ;
- 4) величину момента импульса L в моменты времени t_0 и t_1 ;
- 5) работу A результирующего момента сил в заданном интервале времени $\Delta t = t_1 - t_0$ по формуле механической работы;
- 6) величину кинетической энергии вращения E_{k0} и E_{k1} в моменты времени t_0 и t_1 ;
- 7) работу A результирующей силы в заданном интервале времени $\Delta t = t_1 - t_0$ по теореме о кинетической энергии.

Лабораторная работа № 2.1

АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Термодинамика и молекулярная физика» и «Адиабатический процесс». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение тепловых процессов в идеальном газе

Экспериментальное подтверждение закономерностей адиабатического процесса.

Экспериментальное определение показателя адиабаты, количества степеней свободы и структуры молекул газа в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Термодинамическая система (ТС) - совокупность макроскопических тел, рассматриваемых методами термодинамики, т.е. с точки зрения обмена энергией между телами и внешней средой.

♦ Моль ν (моль) – единица количества вещества. В одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул или атомов. Число частиц, содержащихся в моле вещества, называют **постоянной Авогадро**:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

♦ Молярная масса μ , (кг/моль) – масса одного моля вещества

$$\mu = m_0 N_A, \quad \text{где } m_0 - \text{масса одной молекулы.}$$

♦ Идеальный газ – это физическая модель, в которой молекулы газа считаются материальными точками, не взаимодействующими друг с другом на расстоянии. Соударение таких молекул со стенками сосуда считается абсолютно упругим.

♦ Термодинамические параметры – это параметры, определяющие состояние газа:

- P (Па – паскаль) - давление газа на стенки сосуда;
- V (м³) – объем, занимаемый газом;
- T (К – кельвин) – абсолютная температура.

Температура по шкале Кельвина связана с температурой по шкале Цельсия:

$$T, \text{ К} = 273 + t^{\circ}\text{C}.$$

♦ Термодинамическое равновесие – состояние системы, при котором температура и давление в любой точке системы одинаковы.

♦ Уравнение состояния – уравнение, определяющее связь термодинамических параметров в равновесных процессах.

Уравнением состояния идеального газа является уравнение Менделеева – Клапейрона:

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

где $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная,

$\frac{m}{\mu} = \nu$ – количество вещества (число молей газа), m – масса газа.

Уравнению состояния можно придать другой вид, вводя постоянную Больцмана

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

$$\text{Тогда } PV = \frac{m}{\mu} RT = \frac{R N m_0}{N_A m_0} T \Rightarrow P = \frac{N R}{V N_A} T \Rightarrow P = nkT,$$

где $n = \frac{N}{V}$ – концентрация молекул.

♦ Основное уравнение молекулярно - кинетической теории газов устанавливает связь между давлением газа P , его объемом V и средней кинетической энергией $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle$ молекулы газа:

$$P = \frac{2}{3} n \langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle,$$

где n – концентрация молекул, $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle$ – среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекулы или

Сравнивая с уравнением состояния $P = nkT$, получаем

$$\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Таким образом, абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения одной молекулы.

♦ Средняя квадратичная скорость молекулы

Из соотношений для средней кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального газа $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{m_0 u^2}{2}$ и основного уравнения молекулярно-кинетической теории

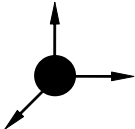
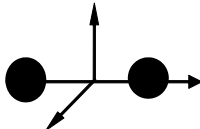
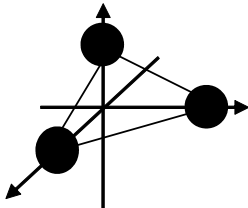
$\langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{3}{2} kT$ можно получить выражение для средней квадратичной скорости молекулы идеального газа

$$u^2 = \frac{3kT}{m_0} = \frac{3RT}{m_0 N_A} = \frac{3RT}{\mu} \quad \text{или}$$

$$u = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \text{ – средняя квадратичная скорость молекулы.}$$

♦ Число степеней свободы молекулы — это количество независимых координат, необходимое для определения положения молекулы в пространстве.

Число степеней свободы для идеального газа жестких молекул

Число степеней свободы	Одноатомный газ	Двухатомный газ	Многоатомный газ
			
Поступательных	3	3	3
Вращательных	-	2	3
Всего	3	5	6

В реальных молекулах нет жесткой связи между атомами внутри молекулы, поэтому необходимо учитывать колебательные степени свободы атомов внутри молекулы. Независимо от общего числа степеней свободы молекулы, *три степени свободы всегда поступательные.*

♦ Закон равного распределения энергии по степеням свободы - на каждую поступательную и вращательную степень свободы молекулы приходится одинаковая энергия, равная $\frac{1}{2} kT$.

♦ Внутренняя энергия U (Дж) идеального газа складывается из кинетической энергии поступательного и вращательного движения его молекул.

$$U = \frac{i}{2} \nu RT$$

♦ Количество теплоты Q (Дж) – это энергия, передаваемая системе путем теплообмена.

♦ Теплоемкость вещества C (Дж/К) — это количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1 градус.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Молярная теплоемкость — теплоемкость одного моля газа.

Удельная теплоемкость - теплоемкость одного килограмма газа.

♦ Работа A (Дж), совершаемая газом при изменении объема:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV.$$

Графически работа определяется площадью под кривой процесса в координатах (P , V). Обмен энергией может происходить в форме работы и в форме теплопередачи.

♦ Первое начало термодинамики является законом сохранения энергии в термодинамических процессах.

Количество теплоты dQ , сообщаемое системе, идет на приращение ее внутренней энергии dU и на совершение системой работы dA :

$$dQ = dU + dA.$$

♦ Изопроцесс — процесс, при котором один из параметров состояния системы не меняется.

○ Изохорный процесс - процесс, протекающий при постоянном объеме, $V = \text{const}$.

При изохорном процессе газ не совершает работу над внешними телами

$$\Delta A = P \Delta V = 0.$$

Вся теплота, сообщаемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии

$$dQ = dU.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при изохорном процессе зависит только от числа степеней свободы молекул

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

○ Изобарный процесс - процесс, протекающий при постоянном давлении, $P = \text{const}$.

При изобарном процессе работа газа при увеличении объема от V_1 до V_2 равна

$$\Delta A = P \Delta V = P(V_2 - V_1).$$

Молярная теплоемкость идеального газа при изобарном процессе больше, чем при изохорном, на величину универсальной газовой постоянной (уравнение Майера), поскольку часть тепла, сообщаемого газу, идет на совершение работы.

$$C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} R$$

○ Изотермический процесс - процесс, протекающий при постоянной температуре, $T = \text{const}$.

При изотермическом процессе работа газа при увеличении объема от V_1 до V_2 равна

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

Внутренняя энергия идеального газа постоянна. Все подводимое к газу тепло расходуется им на совершение работы против внешних сил

$$dQ = dA.$$

Молярная теплоемкость при изотермическом процессе равна бесконечности.

○ Адиабатический процесс – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, $dQ = 0$.

Следовательно, для него характерно наличие хорошей изоляции системы от внешней среды или высокая скорость термодинамического процесса, при которой теплообмен незначителен.

Примеры адиабатических процессов: работа двигателей внутреннего сгорания; процессы, происходящие в термостатах; разряжение и сжатие газа при распространении звуковой волны.

При адиабатическом процессе газ совершает работу только за счет своей внутренней энергии

$$A = -\Delta U = -(U_2 - U_1) = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_1 - T_2).$$

Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона

$$PV^\gamma = \text{const},$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$ показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

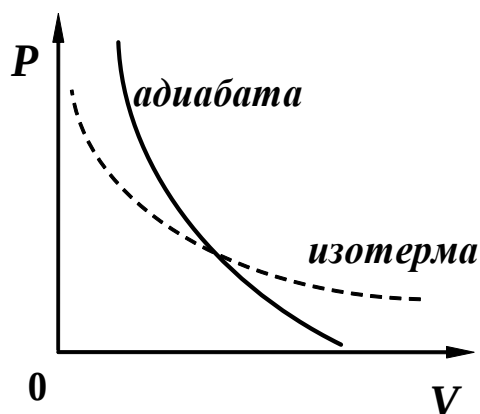


Рисунок. 2

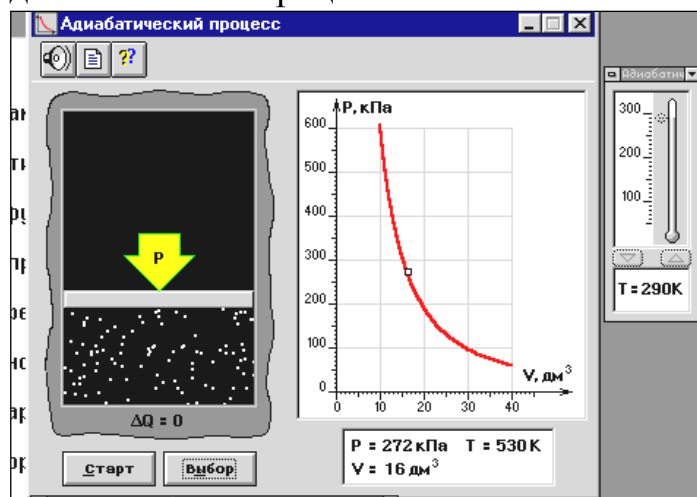
График адиабаты в координатах (P, V) (рис. 2) проходит более круто, чем график изотермы. Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, но и повышением температуры. Теплоемкость при адиабатном процессе равна нулю.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Рассчитайте число степеней свободы для молекулы воды, кислорода, метана, аргона.
2. Получите выражение для молярной теплоемкости идеального газа при изобарном процессе.
3. Получите выражение для показателя адиабаты.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика» и «Адиабатический процесс».



2. Внимательно рассмотрите картинку на экране. Обратите внимание на теплоизоляцию сосуда, в котором будет проходить процесс. Найдите математическую формулировку условия теплоизоляции. Найдите регулятор с движком, задающий начальную температуру газа.
3. С помощью кнопки «Выбор» установите любую начальную температуру газа. Нажмите на экране монитора кнопку «Старт» и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по кривой теоретической адиабаты. Попробуйте

останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп». Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

4. Нажмите кнопку «Выбор» и установите начальную температуру газа T_1 , указанную в таблице 1 для Вашего варианта.

ТАБЛИЦА 1. Начальные значения температуры.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
T_1 , К	50	70	100	120	140	160	180	220
T_2 , К	230	240	250	260	270	280	290	300
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
T_1 , К	60	80	110	130	150	170	190	210
T_2 , К	260	240	270	280	230	270	300	280

5. Запустите процесс, нажав кнопку «Старт». Останавливайте процесс, нажимая кнопку «Стоп», когда точка на теоретической адиабате (красная кривая) будет находиться **вблизи** следующих значений объема: 15, 20, 25, 30, 35 и 40 дм^3 , и записывайте при остановке в таблицу 2 значения объема, температуры и давления.

6. Установите значение температуры T_2 из таблицы 1 для Вашего варианта и повторите измерения по п. 5, записывая результаты в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений

T_1 , К						
V_1 , дм^3						
$\ln V_1$						
P_1 , кПа						
$\ln P_1$						
T_2 , К						
V_2 , дм^3						
$\ln V_2$						
P_2 , кПа						
$\ln P_2$						

7. Постройте по результатам измерений графики зависимости $p = f(V)$, $p = f(T)$, $V = f(T)$ для обоих адиабатических процессов.

8. Рассчитайте логарифмы давления и логарифмы объема. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей

логарифма давления от логарифма объема для обеих адиабат, указав на них начальные температуры.

9. Для каждой адиабаты определите по графику значение показателя адиабаты, используя формулу:

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

10. Определите число степеней свободы молекулы газа, исследуемого в данной компьютерной модели, используя формулу для показателя адиабаты, полученную в задании для допуска.

11. Подберите газ, структура молекул которого близка к структуре молекул исследуемого газа.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что такое параметры состояния системы?
2. Для какого физического газа можно применить модель «идеальный газ»?
3. Напишите уравнение состояния идеального газа в двух видах.
4. Напишите основное уравнение молекулярно - кинетической теории газов.
5. Сформулируйте первое начало термодинамики и напишите его формулу.
6. Дайте определение теплоемкости тела и напишите ее формулу.
7. Дайте определение удельной теплоемкости и напишите ее формулу.
8. Выведите формулу для теплоемкости идеального газа при постоянном объеме, используя первое начало термодинамики.
9. Выведите формулу для теплоемкости идеального газа при постоянном давлении, используя первое начало термодинамики.
10. Что такое число степеней свободы? Чему оно равно для двухатомной молекулы?
11. Что такое показатель адиабаты?
12. Дайте определение адиабатического процесса и напишите его уравнение.
13. Дайте определение изопроцесса. Перечислите известные изопроцессы.
14. Напишите уравнение и нарисуйте PV-диаграмму изотермического, изобарического и изохорического процесса.

Лабораторная работа № 3.1

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие электрических зарядов».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Электрический заряд q (Кл) – физическая величина, характеризующая свойства тел вступать в электромагнитные взаимодействия. Величина любого заряда кратна элементарному заряду q_0

$$q = N \cdot q_0,$$

где N – целое число ($= 1, 2, 3, 4$ и т.д.).

Модуль элементарного заряда $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

♦ Точечным зарядом называется заряд, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других тел.

♦ Закон Кулона определяет силу взаимодействия $\vec{F}_k$ двух точечных зарядов q_1, q_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга: *Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*

$$\vec{F}_k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (1)$$

где r – расстояние между зарядами,

$\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ – единичный вектор вдоль линии, соединяющей заряды,

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$ – электрическая постоянная,

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды: показывает во сколько раз сила взаимодействия зарядов в вакууме больше, чем в среде. Для вакуума (воздуха) $\epsilon = 1$.

♦ Особенности сил взаимодействия точечных зарядов:

1) силы взаимодействия могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания (противоположно заряженные заряды притягиваются, одноименно заряженные – отталкиваются);

- 2) силы взаимодействия – *центральные силы*. Это значит, что они направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды;
 3) силы взаимодействия – *консервативные силы*;
 4) сила взаимодействия F зарядов в среде в ϵ раз меньше силы взаимодействия F_0 зарядов в вакууме

$$F = \frac{F_0}{\epsilon}.$$

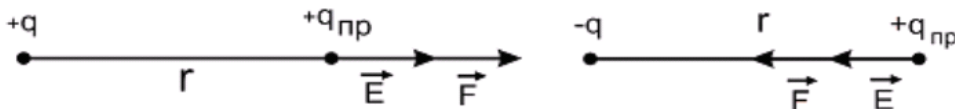
♦ Электромагнитное поле – это вид материи, переносящий действие одной заряженной частицы на другую.

♦ Электростатическое поле – поле, которое создают *неподвижные* точечные заряды.

♦ Напряженность электрического поля $\vec{E}$, В/м или Н/Кл - векторная величина, численно равная силе, действующей со стороны поля на помещенный в данную точку *единичный пробный заряд*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}}, \quad (2)$$

направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.



Поскольку напряженность электрического поля численно РАВНА СИЛЕ, с которой поле действует на единичный положительный заряд, то напряженность является **силовой характеристикой электрического поля**.

Зная напряженность $\vec{E}$, можно определить силу $\vec{F}$, действующую на любой заряд q , помещенный в данную точку поля (закон Кулона в полевой форме):

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3)$$

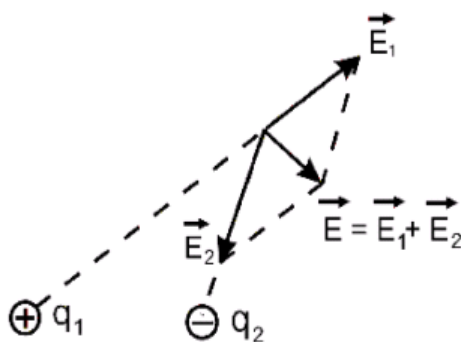


Рисунок 3

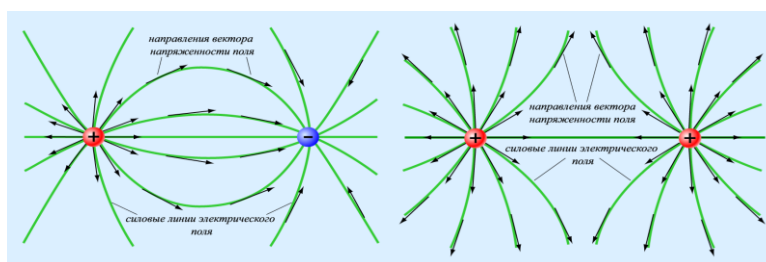
♦ Принцип суперпозиции полей: Если электрическое поле создается системой зарядов $q_1, q_2, \dots, q_n$, то напряженность результирующего поля равна **ВЕКТОРНОЙ** сумме напряженностей полей, которые создает каждый заряд в отдельности (рис.3):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (4)$$

♦ Напряженность электрического поля точечного заряда.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \Rightarrow \vec{E}_{Т.З.} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (5)$$

♦ Силовые линии электрического поля - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряженности поля в той же точке. Силовые линии начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.



♦ Работа при перемещении заряда в электростатическом поле

Работа силы при перемещении тела из точки 1 в точку 2 по определению механической работы равна:

$$A_{12} = \int_1^2 (\vec{F} d\vec{l}).$$

В электростатическом поле на заряд действует сила $\vec{F} = q\vec{E}$, поэтому работа по перемещению заряда q_0 из точки 1 в точку 2 :

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) \quad (6)$$

Кулоновская сила, действующая на заряд в электростатическом поле, является консервативной силой. Поэтому *работа сил электростатического поля по перемещению заряда не зависит от траектории движения и определяется только начальным и конечным положениями заряда.*

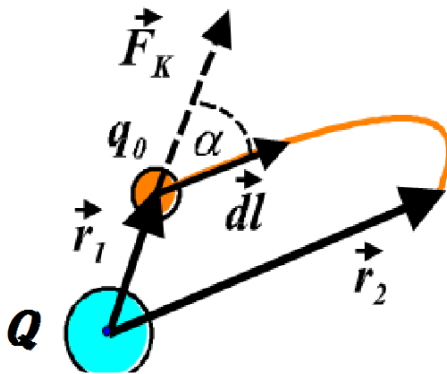


Рисунок 4

Пусть электростатическое поле создается точечным зарядом $+Q$ (рис.4). Напряженность поля точечного

заряда равна $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$. Тогда,

вычисляя по формуле (6), работа сил электростатического поля по перемещению заряда q_0 из точки 1 в точку 2 будет

$$A_{12} = \frac{q_0 Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (7)$$

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по замкнутому пути равна нулю

$$q_0 \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0 \quad \text{или} \quad \text{т.к. } q_0 \neq 0, \quad \text{то} \quad \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0$$

Циркуляция вектора напряженности – это интеграл от вектора $\vec{E}$ по замкнутому контуру L

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) \quad (8)$$

Теорема о циркуляции вектора напряженности. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль любого замкнутого контура равна нулю $\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0$.

Силовое поле, циркуляция которого равна нулю, называется **потенциальным полем.**

♦ Потенциальная энергия заряда

Электростатические силы - это консервативные силы. Работа консервативных сил совершается за счет убыли потенциальной энергии

$$A_{12} = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1}) = W_{p1} - W_{p2}. \quad (9)$$

Если заряд q_0 находится в поле точечного заряда $+Q$ на расстоянии r от него, то он будет обладать потенциальной энергией (см. (7) и (9))

$$W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_0 Q}{r}. \quad (10)$$

♦ Потенциал φ , В (вольт) - скалярная величина, численно равная потенциальной энергии, которой обладает единичный положительный заряд в данной точке поля.

$$\varphi = \frac{W_p}{q_{np}}. \quad (11)$$

Поэтому потенциал - это *энергетическая характеристика поля*.

Потенциал поля, созданного точечным зарядом Q :

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{Q}{r}, \quad (12)$$

где r - расстояние от заряда Q до точки, в которой определяется потенциал поля.

Работа сил электростатического поля по перемещению заряда q_0 из точки **1** в точку **2** (формула 9) может быть выражена через *разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$)*:

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (13)$$

Разность потенциалов равна работе сил электрического поля по перемещению единичного заряда из одной точки в другую.

$$\Delta\varphi = \frac{A_{эл}}{q} \quad (14)$$

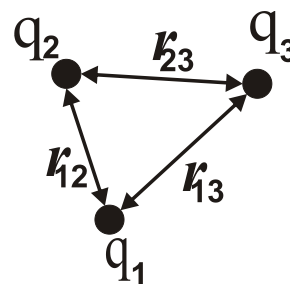
Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется *эквипотенциальной поверхностью*.

♦ Принцип суперпозиции потенциалов: Если электрическое поле создается системой зарядов $q_1, q_2, \dots, q_n$, то потенциал результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, которые создает каждый заряд в отдельности.

$$\Delta\varphi = \sum \varphi_i$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

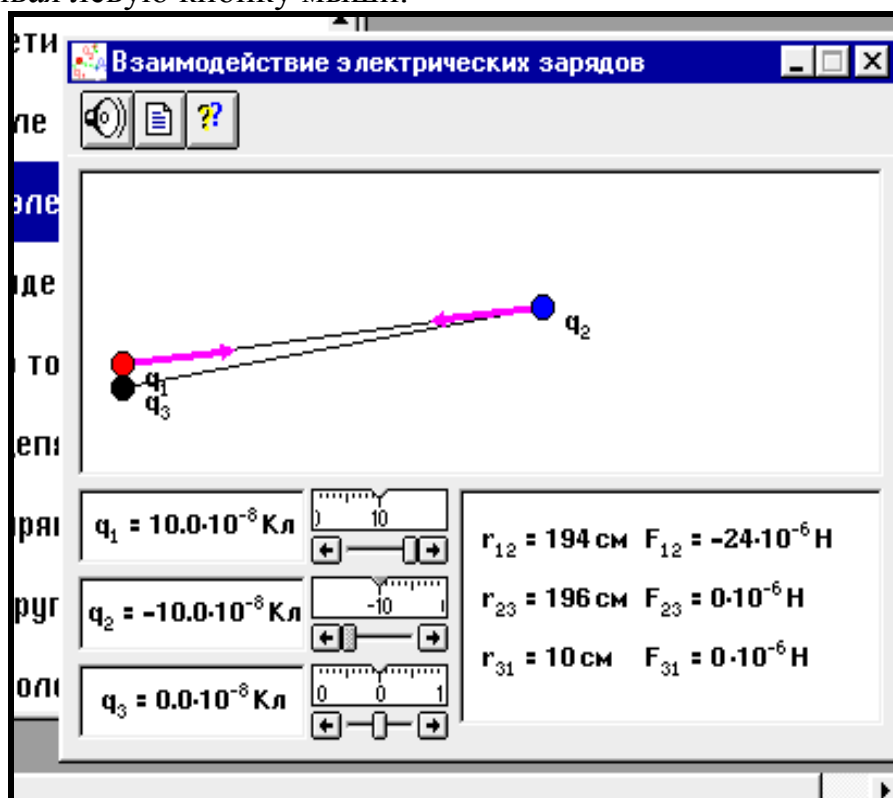
Дана система из трех точечных зарядов q_1 , q_2 и q_3 . Заряды q_2 и q_3 – положительные, заряд q_1 – отрицательный. Расстояния между зарядами r_{12} , r_{13} и r_{23} , соответственно (рис.).



1. Нарисуйте результирующую силу, действующую на каждый заряд.
2. Рассчитайте величину результирующей силы, считая, что $r_{12} = r_{13} = r_{23}$.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие электрических зарядов».
2. Рассмотрите внимательно рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения зарядов. Попробуйте изменить расстояние между зарядами, зацепив маркером мыши заряд и удерживая левую кнопку мыши.



3. Протестируйте модель. Для этого установите значения зарядов q_1 , q_2 и q_3 согласно номеру Вашего варианта из таблицы 6 дополнительного задания (в конце работы). Расстояния между зарядами установите произвольно. Рассчитайте по закону Кулона значения сил, действующих со стороны первого заряда на второй F_{12} и третий F_{13} , а также со стороны второго заряда на третий F_{23} . Все

результаты расчета занесите в таблицу 1. Сравните полученные Вами величины сил с измеренными значениями (на экране компьютера).

ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели.

					Результаты расчета	Результаты измерения
$q_1, Кл$		$r_{12}, м$		$F_{12}, Н$		
$q_2, Кл$		$r_{13}, м$		$F_{13}, Н$		
$q_3, Кл$		$r_{23}, м$		$F_{23}, Н$		

4. Не закрывая окна «Взаимодействие электрических зарядов», откройте рядом окно «Электрическое поле точечного заряда». В нижнем правом прямоугольнике «Конфигурация» щёлкните мышью на кнопке «Один заряд». Щёлкните мышью на кнопках «Силовые линии» и «Эквипотенциали». Меняя величину и знак заряда, проследите за изменением числа и направления силовых линий.

5. Зарисуйте силовые линии и эквипотенциальные поверхности для случаев положительного и отрицательного заряда в Ваш отчет.

6. Щёлкните мышью на кнопке «Два заряда». Меняя величины и знаки зарядов, проследите за изменением конфигурации силового поля. Посмотрите, как меняется поле при изменении расстояния между зарядами. Запишите наблюдения.

7. Зарисуйте силовые линии для случая двух одноименных зарядов и для случая двух противоположных зарядов.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

ТАБЛИЦА 2. Значения величины заряда q_1 (два значения).

Вариант	$q_1, нКл$		Вариант	$q_1, нКл$	
1	40	-60	9	100	-20
2	20	-70	10	90	-30
3	30	-80	11	10	-80
4	10	-50	12	20	-50
5	50	-90	13	30	-70
6	60	-40	14	40	-10
7	70	-20	15	50	-100
8	80	-30	16	60	-90

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений (9 столбцов)

1) $q_1 = \text{--- нКл};$ 2) $q_1 = \text{--- нКл};$	$q_2 = \text{--- нКл};$	$q_3 = \text{--- нКл}.$		
$r, \text{см}$	20	30	...	100
$1/r^2, \text{м}^{-2}$				
$F_1, \text{Н}$ (для первого значения q_1)				
$F_2, \text{Н}$ (для второго значения q_1)				
$E_1, \text{В/м}$				
$E_2, \text{В/м}$				

8. Активизируйте окно «Взаимодействие электрических зарядов». Рассмотрим взаимодействие двух зарядов q_1 и q_2 . Заряд q_3 исключим из взаимодействия, для чего следует установить его значение равным нулю и поместить его в левый нижний угол окна опыта.

9. Заряд q_1 (он создает исследуемое поле) поместите в левый верхний угол окна опыта. Установите первое значение заряда q_1 , соответствующее номеру Вашего варианта из таблицы 2.

10. Заряд q_2 поместите рядом с q_1 на расстоянии $r = 20 \text{ см}$ от него (r_{12} в окне опыта) и установите равным 10^{-8} Кл . Это - пробный заряд, с помощью которого будем исследовать поле заряда q_1 . Запишите в соответствующую ячейку таблицы 3 величину силы F_1 взаимодействия зарядов (F_{12} в окне опыта).

11. Увеличивайте расстояние между зарядами каждый раз на 10 см и записывайте значение силы F_1 в таблицу.

12. Установите второе значение заряда q_1 , соответствующее номеру Вашего варианта из таблицы 2. Продолжите заполнение таблицы 3 – значения силы F_2 для второго значения q_1 .

13. Рассчитайте величину напряженности электростатического поля E_1 и E_2 для соответствующих значений заряда q_1 и расстояний r по формуле 5.

14. Постройте на одном листе графики зависимостей напряженности поля точечного заряда E_1 и E_2 от квадрата обратного расстояния $1/r^2$ между ними.

15. Из каждого графика по его наклону определите значение электрической постоянной ϵ_0 , используя формулу

$$\epsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta(\frac{1}{r^2})}{\Delta(E)}$$

16. Сравните полученные значения с теоретическим значением электрической постоянной. Сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Перечислите основные свойства заряда.
2. Запишите закон Кулона. Нарисуйте зависимость $F(q)$ и $F(r)$. Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов, если расстояние уменьшить вдвое, а величину каждого заряда увеличить в четыре раза?
3. Запишите закон Кулона в полевой форме.
4. Какое поле называется электростатическим? Что является его источником?
5. Дайте определение напряженности поля точечного заряда.
6. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрических полей. В каких случаях необходимо применять принцип суперпозиции?
7. Какое поле называется потенциальным? Запишите условие потенциальности поля.
8. Что такое силовые линии напряженности поля и как они направлены?
9. Дайте определение потенциала электрического поля. Чему равен потенциал поля точечного заряда?
10. Какова связь между потенциалом и напряженностью электрического поля?
11. Как выражается работа по перемещению заряда в электрическом поле: а) через напряженность поля; б) через разность потенциалов.
12. Какие поверхности называются эквипотенциальными? Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
13. Каково взаимное расположение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электрического поля? Почему?

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

В точке с координатами $X_1=0$, $Y_1=0$ находится точечный заряд q_1 . В точке с координатами X_2 и $Y_2=0$ находится точечный заряд q_2 . Заряд q_3 помещается в точку поля с координатами X_3 , Y_3 . Система зарядов находится в воздухе.

Числовые значения X_2 , X_3 , Y_3 , q_1 , q_2 и q_3 задаются для каждого варианта (таблица 6):

ТАБЛИЦА 6. Числовые значения величин X_2 , X_3 , Y_3 , q_1 , q_2 и q_3 .

Вариант	X_2 , см	X_3 , см	Y_3 , см	q_1 , нКл	q_2 , нКл	q_3 , нКл
1	60	75	80	-10	20	30
2	65	80	60	-20	10	40
3	70	85	70	-30	20	10
4	75	90	120	-40	50	30
5	80	95	110	-30	60	20
6	85	100	130	-40	70	20
7	90	105	75	-50	60	30
8	95	110	80	-60	70	40
9	100	120	60	-70	100	50
10	105	60	90	-60	90	40
11	110	65	85	-80	50	70
12	115	70	80	-90	80	50
13	120	75	70	-100	70	60
14	125	80	65	-80	70	100
15	130	85	60	-90	100	50
16	135	90	55	-100	50	60

а) в отсутствие заряда q_3 :

- 1) Определить силу Кулона $\vec{F}_{12}$, действующую на заряд q_2 со стороны заряда q_1 и указать на рисунке ее направление;
- 2) Определить потенциальную энергию системы зарядов q_1 и q_2 ;
- 3) Определить напряженность поля $\vec{E}_3$ в исследуемой точке поля X_3 , Y_3 , и обозначить на рисунке ее направление;
- 4) Определить потенциал поля Φ_3 в исследуемой точке поля X_3 , Y_3 .

б) поместите заряд q_3 в исследуемую точку поля x_3 , y_3 и в присутствии заряда q_3 :

- 5) Определить силу Кулона $\vec{F}_3$, действующую на заряд q_3 со стороны зарядов q_1 и q_2 . Обозначить на рисунке ее направление;
- 6) Определить потенциальную энергию заряда q_3 в поле системы зарядов q_1 и q_2 .

Лабораторная работа № 3.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И К.П.Д. ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование зависимости мощности и к.п.д. источника постоянного тока от сопротивления внешней цепи.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Электрический ток – упорядоченное движение заряженных частиц. За направление тока принимают направление движения ПОЛОЖИТЕЛЬНО заряженных частиц.

♦ Сила ток I , А (ампер) – скалярная величина, равная заряду, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

♦ Постоянный электрический ток – электрический ток, не меняющийся с течением времени:

$$I = \frac{q}{t}$$

♦ Плотность электрического тока, $\vec{j}$, А/м² – вектор, совпадающий с направлением электрического тока и численно равный току через единицу поверхности, перпендикулярной направлению тока

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}}. \quad (2)$$

Вектор плотности тока характеризует направление электрического тока в разных точках поверхности и распределение силы тока по этой поверхности. Сила тока через произвольную поверхность S :

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S} \quad (3)$$

♦ Электрическое сопротивление R , Ом – величина, характеризующая способность проводника препятствовать прохождению по нему электрического тока. Электрическое

сопротивление зависит от материала, из которого сделан проводник, и от его геометрических размеров:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (4)$$

где ρ – *удельное сопротивление (Ом·м)* – зависит от свойств материала проводника;

l – длина проводника;

S – площадь поперечного сечения проводника.

♦ Условия существования электрического тока:

- свободные заряды, способные перемещаться под действием электрического поля,
- электрическое поле внутри проводника,
- источник энергии (тока), поддерживающий напряженность поля внутри проводника.

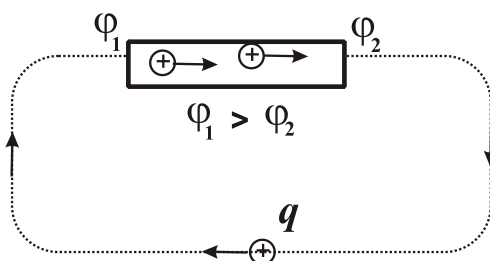


Рисунок. 5

Если в проводнике создать электрическое поле и затем не поддерживать его неизменным, то за счет перемещения зарядов поле исчезнет и ток прекратится. Для того, чтобы поддерживать ток неизменным, необходимо от конца проводника (рис.5) с меньшим потенциалом φ_2 отводить приносимые туда током заряды и переносить их к началу проводника с большим потенциалом φ_1 . Необходимо создать круговорот зарядов, а для этого надо замкнуть цепь. Однако, **работа сил электростатического поля по замкнутому контуру равна нулю**. Электростатическое поле (кулоновская сила) не может создать движение заряда по замкнутому контуру проводника.

Это возможно лишь за счет работы сторонних сил не электростатической природы.

♦ Сторонние силы – силы не электростатического происхождения, действующие на заряды внутри источника тока. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля.

♦ Электродвижущая сила (ЭДС) ε , В (вольт) – численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника тока:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{СТ}}{q_0} . \quad (5)$$

♦ **Напряжение в электрической цепи** U , В (вольт) – это суммарная работа, совершаемая электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{КУЛОН}}{q_0} + \frac{A_{СТ}}{q_0} \Rightarrow$$

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12} . \quad (6)$$

При отсутствии сторонних сил ($\mathcal{E} = 0$) напряжение равно разности потенциалов.

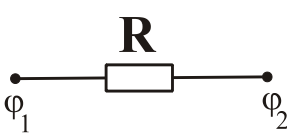
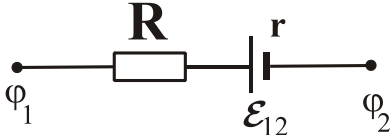
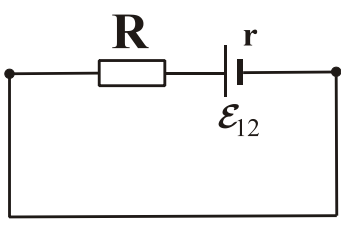
♦ **Однородный участок цепи** – участок цепи, не содержащий ЭДС (источник тока).

♦ **Неоднородный участок цепи** – участок цепи, содержащий ЭДС (источник тока).

♦ **Закон Ома:** Сила тока, протекающего в цепи, прямо пропорциональна напряжению в цепи и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

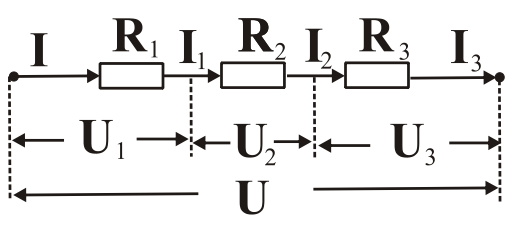
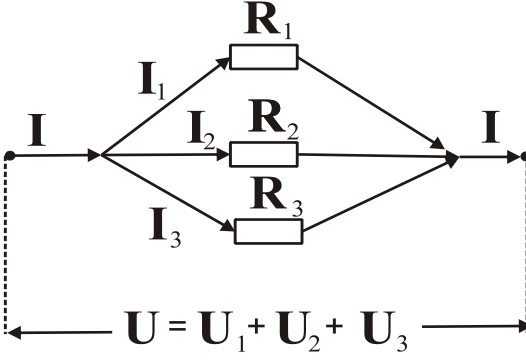
Полное сопротивление цепи складывается из внешнего сопротивления нагрузки R и внутреннего сопротивления источника тока r .

Закон Ома для однородного участка цепи	Закон Ома для неоднородного участка цепи	Закон Ома для замкнутой цепи
		
$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (7a)$	$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}{R + r} \quad (7б)$	$I = \frac{\mathcal{E}_{12}}{R + r} \quad (7в)$

♦ **Ток короткого замыкания** – максимальный ток, который можно получить от данного источника, если внешнее сопротивление отсутствует. Он определяется ЭДС источника тока и его внутренним сопротивлением

$$I_{к.з.} = \frac{\mathcal{E}}{r} . \quad (8)$$

♦ Соединение проводников

Последовательное соединение проводников	Параллельное соединение проводников
	
$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots$ $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$ $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$	$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots$ $U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$ $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$

♦ Работа тока

Если по проводнику протекает электрический ток, то проводник нагревается. Нагревание проводника происходит за счет работы, совершаемой силами электрического поля по перемещению зарядов. Работа по перемещению заряда в однородном проводнике

$$dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = dqU$$

За время dt через проводник проходит заряд $dq = Idt$ и работа равна

$$dA = UI dt .$$

По закону Ома для однородного участка цепи $U = R \cdot I$ и $dA = I^2 R dt$.

Работа за промежуток времени от t_1 до t_2

$$A = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt \quad (9)$$

Если ток постоянный, то

$$A = I^2 R \Delta t . \quad (10)$$

♦ **Закон Джоуля – Ленца** – если ток проходит по неподвижному проводнику, то работа тока полностью преобразуется в тепловую энергию Q (т.е. идет на нагревание проводника)

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt \quad (11)$$

Для постоянного тока:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (12)$$

♦ **Мощность тока P , Вт** – работа тока за единицу времени:

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t}. \quad (13)$$

Мощность тока на участке цепи без ЭДС можно вычислить по любой из следующих формул:

$$P = UI, \quad P = \frac{U^2}{R}, \quad P = I^2 R. \quad (14)$$

Если в цепи имеется источник ЭДС, то

$$P_{пол} = UI \quad - \text{полезная мощность тока во внешнем участке цепи} \quad (15)$$

$$P_T = I^2 R \quad - \text{мощность тока, затрачиваемая на тепловое действие (потеря мощности);} \quad (16)$$

$$P_{ист} = \mathcal{E} \cdot I \quad - \text{мощность источника тока.} \quad (17)$$

♦ **Коэффициент полезного действия источника тока η** показывает, какая доля мощности, развиваемая источником тока, выделяется во внешней цепи:

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{ист}}, \quad \text{или} \quad \eta = \frac{IU}{\mathcal{E}I} = \frac{U}{\mathcal{E}}. \quad (18)$$

По закону Ома $U = I \cdot R$, а $\mathcal{E} = I \cdot (R + r)$ и

$$\eta = \frac{R}{R + r}. \quad (19)$$

КПД определяется отношением сопротивления внешнего участка цепи к общему сопротивлению цепи.

Мощность источника тока расходуется на внешнем участке цепи и на нагревание самого источника

$$P_{ист} = P_{пол} + P_2 \quad \text{или} \quad \mathcal{E}I = U \cdot I + I^2 \cdot r,$$

где P_2 – потеря мощности на внутреннем сопротивлении источника.

$$P_2 = I^2 \cdot r \quad (20)$$

Отсюда следует, что полезная мощность, выделяемая во внешней цепи,

$$P_{пол} = \varepsilon I - I^2 \cdot r, \quad (21)$$

т.е. $P_{пол}$ изменяется с изменением силы тока в цепи по параболическому закону и принимает нулевые значения при $I = 0$ и

при $I_{кз} = \frac{\varepsilon}{r}$. Первое значение соответствует разомкнутой цепи, второе – короткому замыканию.

Для того, чтобы найти максимально возможную мощность во внешней цепи, нужно продифференцировать выражение (21) по току и приравнять производную к нулю:

$$\frac{dP_{пол}}{dI} = \varepsilon - 2Ir = 0$$

Мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает своего максимального значения при силе тока

$$I = \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{I_{кз}}{2} \quad (22)$$

и равна

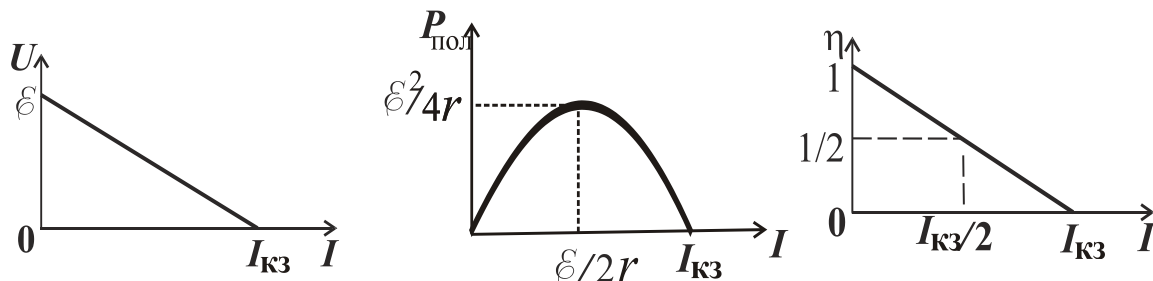
$$P_{пол, max} = \frac{\varepsilon^2}{4r} \quad (23)$$

Зависимость КПД источника от силы тока в цепи

$$\eta = 1 - \frac{r}{\varepsilon} I \quad (25)$$

КПД достигает наибольшего значения $\eta=1$ в случае разомкнутой цепи ($I = 0$), а затем уменьшается по линейному закону, обращаясь в нуль при коротком замыкании.

На рис. 6 показаны зависимости от тока в цепи напряжения в цепи, полезной мощности во внешней цепи и КПД источника тока.



Зависимость
напряжения от тока

Зависимость полной
мощности во внешней
цепи от тока

Зависимость КПД
источника от тока

Рисунок 6

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Решите задачи:

Задача 1. Три сопротивления **1 Ом**, **2 Ом** и **3 Ом** соединены параллельно. Сделайте рисунок. Найдите силу тока в каждом сопротивлении, если общая сила тока равна **11 А**.

Задача 2. Цепь состоит из трех последовательно соединенных проводников. Сопротивление первого проводника **4 Ом**, второго **6 Ом**, а напряжение на концах третьего проводника равно **4 В**. Общее напряжение на проводниках **24 В**. Сделайте рисунок. Найдите силу тока в цепи и напряжение на концах первого и второго проводников.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока».

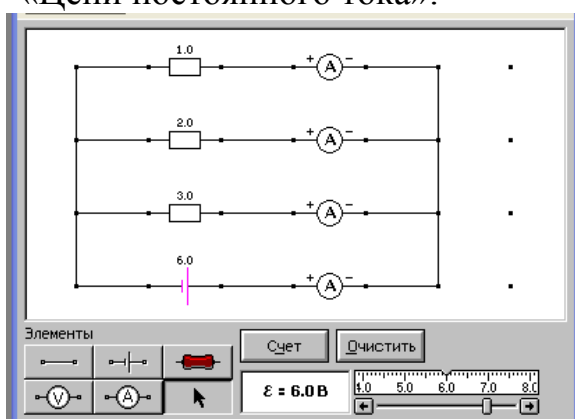


Схема к задаче 1

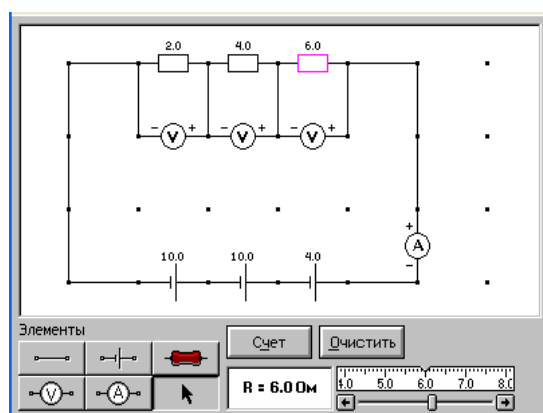
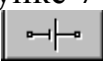


Схема к задаче 2

Рисунок 7

2. **Протестируйте модель.** Для этого соберите схемы, соответствующие задачам в задании для допуска (рис. 7). Сначала соберите цепь, показанную на рисунке 7 схема 1. Для этого щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой  ЭДС в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен источник ЭДС.

Далее разместите последовательно с источником амперметр (кнопка  там же). Затем расположите аналогичным образом резисторы нагрузки и другие амперметры.

Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода  внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкайте левой кнопкой мыши в местах рабочей зоны экрана, где должны находиться соединительные провода.

3. Установите значения параметров для каждого элемента, заданные в условиях задач или полученные Вами при их решении. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой . Затем щелкните на выбранном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до нужного значения. После того, как вы установили значения всех сопротивлений и ЭДС, нажмите кнопку «Счёт» и запишите показания электроизмерительных приборов. Заполните таблицу 1. Сравните величины силы токов и напряжений, полученных при компьютерном измерении, с расчетными значениями, полученными при решении задач.

ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели.

<i>задача 1</i>			<i>задача 2</i>		
	Расчет	Измерение		Расчет	Измерение
I_1			U_1		
I_2			U_2		
I_3			I		

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

4. Соберите цепь, показанную на рисунке 8. Для этого разместите последовательно с источником тока резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку  в нижней части экрана).

5. Установите значения ЭДС и внутреннего сопротивления согласно Вашему варианту из таблицы 2.

ТАБЛИЦА 2. Исходные параметры электрической цепи

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\mathcal{E}, В$	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5
$r, Ом$	5,8	6,7	6,6	7,5	5,4	4,3	3,2	2,1
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
$\mathcal{E}, В$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
$r, Ом$	3,0	4,6	4,8	5,0	5,5	5,9	4,1	3,5

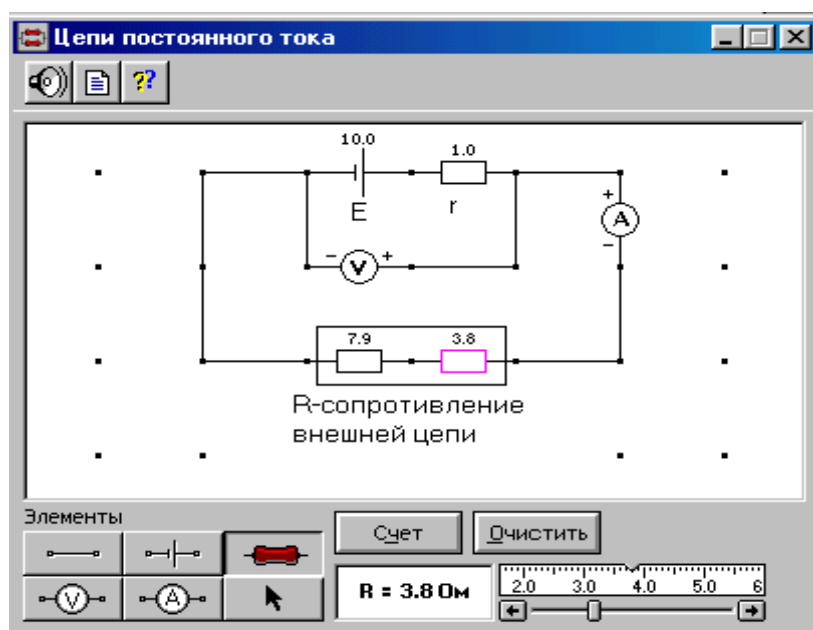


Рисунок 8

6. Установите сопротивление внешней цепи **2 Ом**, нажмите кнопку «Счёт» и запишите показания амперметра и вольтметра в таблицу 3.
7. Последовательно увеличивайте с помощью движка регулятора сопротивление внешней цепи на **0,5-1 Ом** от **2 Ом** до **20 Ом** и, нажимая кнопку «Счёт», записывайте показания электроизмерительных приборов в таблицу 3.
8. Вычислите по формулам (15), (20), (17), (18) $P_{пол}$, P_2 , $P_{ист}$ и η для каждой пары показаний вольтметра и амперметра и запишите рассчитанные значения в таблицу 3.
9. Постройте графики зависимости U , $P_{пол}$, P_2 , $P_{ист}$ и η от полного тока во внешней цепи I . Графики можно строить на одном листе миллиметровки цветными карандашами.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЁТОВ

$R, \text{Ом}$	2,0	2,5	3,0	...			20
$U, \text{В}$							
$I, \text{А}$							
$P_{пол}, \text{Вт}$							
$P_2, \text{Вт}$							
$P_{ист}, \text{Вт}$							
η							

10. Продолжите построенные графики до пересечения с осями координат. Определите по графикам величину ЭДС, тока короткого замыкания и внутреннее сопротивление источника. Сравните полученные данные с Вашими исходными значениями ЭДС и внутреннего сопротивления.
11. Определите по графикам, при каком значении внешнего сопротивления R полезная мощность во внешней цепи $P_{пол}$ максимальна. Определите, чему равно при этом КПД.
12. Сделайте выводы.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что называется электрическим током? Постоянным электрическим током? Как направлен электрический ток?
2. Дайте определения силы тока и плотности тока. В каких единицах они измеряются?
3. Как зависит сопротивление проводника от его размеров, формы и материала?
4. Что такое удельное сопротивление? В каких единицах оно измеряется?
5. Как рассчитать сопротивление участка цепи при последовательном и параллельном соединении проводников?
6. Какие силы называются сторонними?
7. Что такое электродвижущая сила источника?
8. Что называется напряжением на участке цепи?
9. Какой участок цепи называется однородным? Неоднородным?
10. Закон Ома для однородного и неоднородного участка цепи.
11. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
12. Что называется током короткого замыкания?
13. Как рассчитать работу постоянного тока? Закон Джоуля - Ленца.
14. Что такое мощность источника тока? На что она расходуется?
15. Что определяет КПД источника тока?

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.

Рассчитать участок цепи, представленный на рисунке, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$. Числовые значения U и R заданы в таблице 4 для каждого варианта.

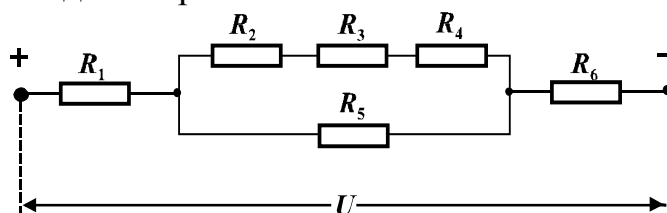


ТАБЛИЦА 4. Числовые значения U и R для каждого варианта:

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U(B) =$	83	110	138	165	193	220	248	275
$R(A) =$	3	4	5	6	7	8	9	10
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
$U(B) =$	41	28	14	55	88	11	22	33
$R(A) =$	15	22	24	28	32	16	20	12

ОПРЕДЕЛИТЬ:

- 1) Полное сопротивление цепи.
- 2) Полный ток (силу тока на всем участке цепи).
- 3) Силу тока и напряжение на каждом сопротивлении.
- 4) Мощности токов на каждом сопротивлении.
- 5) Мощности токов, выделяющиеся на участках цепи.

Лабораторная работа № 4.1

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Магнитное поле прямого тока».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Электромагнитное поле – это вид материи, переносящий действие одной заряженной частицы на другую.

Подобно тому, как в пространстве, окружающем НЕПОДВИЖНЫЕ электрические заряды, возникает **электрическое** поле, так и в пространстве, которое окружает электрические токи (ДВИЖУЩИЕСЯ электрические заряды), возникает **магнитное** поле.

♦ Магнитное поле – это поле, которое создается электрическим током, движущимся зарядом или магнитом.

Электрическое поле действует как на неподвижные, так и на движущиеся электрические заряды. *Магнитное поле действует только на движущиеся заряды и не действует на неподвижные заряды.*

♦ Элемент тока $I d\vec{l}$ – это вектор, численно равный произведению силы тока I на элемент длины проводника $d\vec{l}$ и направленный по направлению тока. Элемент тока – это аналог движущегося точечного заряда:

$$I \cdot d\vec{l} = \frac{dq}{dt} d\vec{l} = dq \frac{d\vec{l}}{dt} = dq \cdot \vec{v} \quad (1)$$

♦ Магнитная индукция $\vec{B}$, Тл (тесла) - силовая характеристика магнитного поля. Это вектор, численно равный максимальной силе $\vec{F}_{\max}$, действующей на единичный элемент тока $I d\vec{l}$, помещенный в данную точку магнитного поля:

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}_{\max}|}{|I d\vec{l}|}. \quad (2)$$

♦ **Линии магнитной индукции** – линии, в каждой точке которых вектор магнитной индукции $\vec{B}$ направлен по касательной. Направление линий индукции связано с направлением тока *правилом правого винта* (рис. 9).

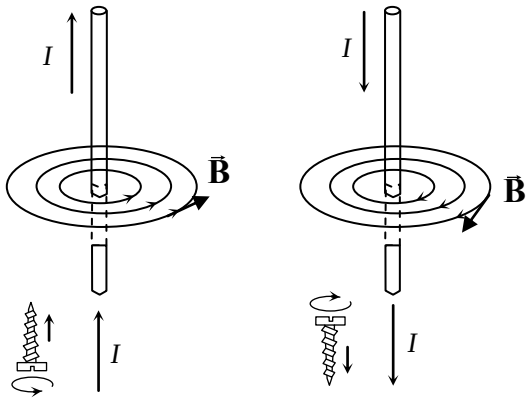


Рисунок 9

Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением прямого тока I , то направление вращения его рукоятки укажет направление линий магнитной индукции $\vec{B}$.

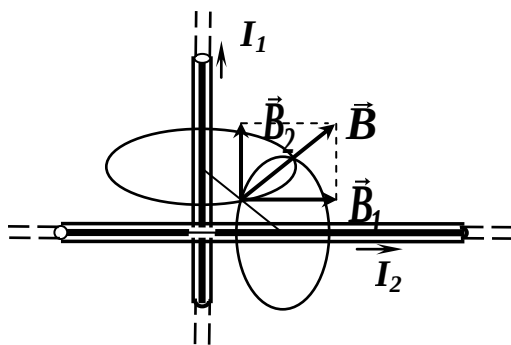


Рисунок 10

♦ **Принцип суперпозиции** (рис. 10): если магнитное поле в точке создается несколькими токами, то результирующая индукция находится как векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым током в отдельности

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (3)$$

На рис.11 изображены силовые линии некоторых конфигураций токов.

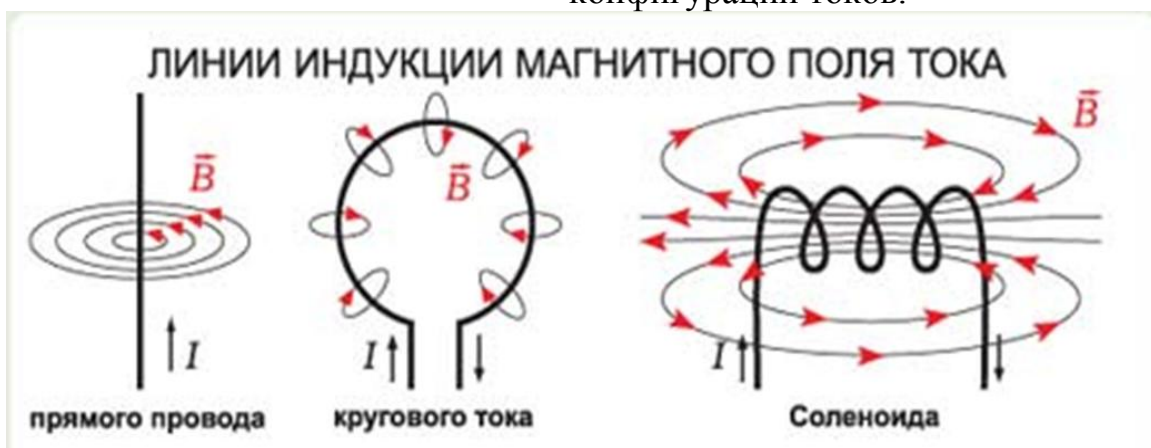


Рисунок 11

Линии индукции магнитного поля (силовые линии) **всегда замкнуты**. Для прямого тока они представляют собой концентрические окружности.

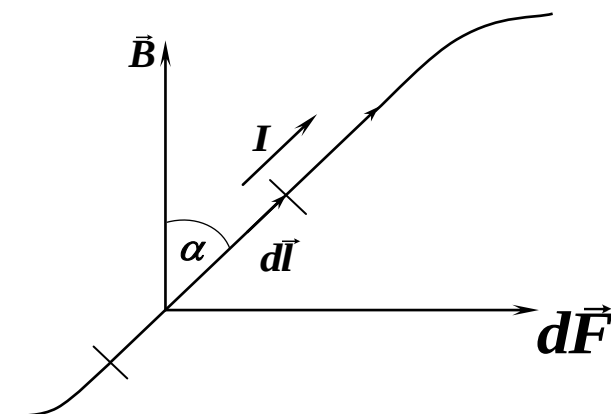


Рисунок 12

♦Закон Ампера - на отрезок проводника длиной $d\vec{l}$ с током I , помещенный в магнитное поле $\vec{B}$, действует магнитная сила (сила Ампера), величина которой равна

$$dF_A = IBdl \sin\alpha \quad (4)$$

где α – угол между вектором $\vec{B}$ и направлением элемента тока $I d\vec{l}$ (рис. 12).

♦Направление силы Ампера определяется правилом левой руки: Если расположить левую руку так, чтобы четыре пальца совпадали с направлением тока, а вектор $\vec{B}$ входил в ладонь, то большой палец укажет направление силы Ампера.

В векторном виде
$$d\vec{F}_A = I [d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (5)$$

Сила Ампера, действующая на прямой проводник с током I и длиной l , помещенный в однородное магнитное поле $\vec{B}$, равна

$$F_A = IBl \sin\alpha. \quad (6)$$

♦Закон Био-Савара-Лапласа - каждый элемент $d\vec{l}$ проводника с током I создает магнитное поле (рис. 13), индукция которого в точке с радиус-вектором $\vec{r}$ относительно элемента $d\vec{l}$ определяется как:

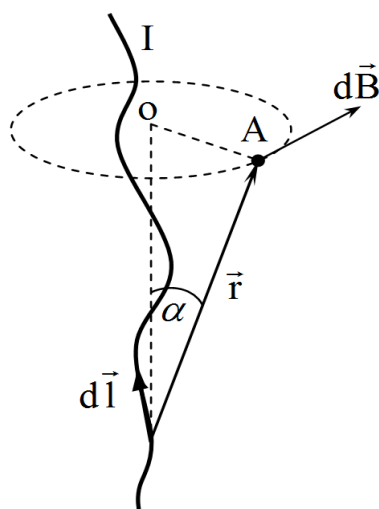


Рисунок 13

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad (7)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная,

$$\mu = \frac{F_{\text{в среде}}}{F_{\text{в вакууме}}} \quad \text{— магнитная}$$

проницаемость среды — физическая величина, показывающая во сколько раз сила магнитного взаимодействия в среде отличается от силы взаимодействия в вакууме.

Направление вектора $d\vec{B}$ определяется по правилу правого винта. Рукоятку буравчика при этом следует вращать от первого вектора ($d\vec{l}$) ко второму ($\vec{r}$). Вектор $d\vec{B}$ всегда направлен перпендикулярно к плоскости, проходящей через вектора $d\vec{l}$ и $\vec{r}$. Величина вектора магнитной индукции $d\vec{B}$ элемента тока определяется выражением:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (8)$$

где α — угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{r}$.

Согласно принципу суперпозиции (3) индукция $\vec{B}$ результирующего поля проводника с током равна векторной сумме вкладов $d\vec{B}$ отдельных элементов $d\vec{l}$ проводника, т.е. рассчитывается с помощью криволинейного интеграла по длине L проводника:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B}. \quad (9)$$

Магнитная индукция B поля, создаваемого бесконечным прямолинейным проводником с током I , на расстоянии r от него:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (10)$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Решите задачи.

Задача 1. В воздухе ($\mu=1$) расположены два прямых проводника с током I_1 и I_2 на расстоянии r друг от друга. (Отрицательный ток

направлен в плоскость рисунка $\otimes$, положительный - из плоскости рисунка $\odot$).

1. Нарисуйте силовые линии магнитных полей, создаваемых каждым током.
2. Определите и отметьте на рисунке направление векторов магнитной индукции B_1 и B_2 в точках, где расположены токи. Используя данные таблицы 1, вычислите их значения по формуле 10.

ТАБЛИЦА 1. Числовые значения I_1 , I_2 и r :

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I_1(A)$	-2	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1	-0.8	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	-1.8	1.4
$I_2(A)$	1.2	1	0.8	-1.8	-2	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1
$r (м)$	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	0.95	0.9	0.85	1.35	1.4	0.9	0.8	1.3	0.75

3. Определите и отметьте на рисунке направление силы Ампера, действующей на проводники с током. Вычислите ее величину по формуле 6.

Задача 2. Ток $I_0 = 10 A$ помещается в точку, находящуюся на середине отрезка, соединяющего токи I_1 и I_2 . Направлен I_0 вверх от плоскости рисунка, параллельно токам I_1 и I_2 .

1. Определите величину и направление вектора магнитной индукции в этой точке, используя данные таблицы 1.
2. Определите величину и направление силы Ампера $\vec{F}_A$, действующей на каждый метр проводника с током I_0 со стороны токов I_1 и I_2 .

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие параллельных токов».

2. Внимательно рассмотрите рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения силы тока и расстояния между проводниками.

3. **Протестируйте модель.** Для этого установите значения токов и расстояния между ними, соответствующие Вашему варианту в задаче №1 (см. Задание для допуска). Заполните таблицу 2.

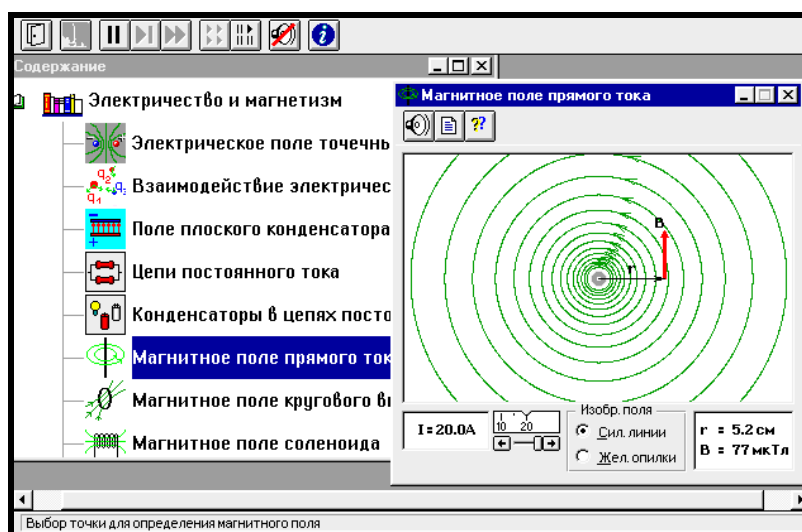
ТАБЛИЦА 2. Тестирование модели.

$I_1 = \quad I_2 = \quad r =$			
	$\vec{B}_{12}$	$\vec{B}_{21}$	$\vec{F}_A$
Результаты расчетов			
Результаты измерений			

Получите у преподавателя допуск для выполнения лабораторной работы. Приступайте к измерениям.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОЙ ПОСТОЯННОЙ.

4. Выберите «Электричество и магнетизм» и работу «Магнитное поле прямого тока». Наблюдайте линии индукции МП прямого провода.



5. Зацепив мышью движок регулятора тока, зафиксируйте величину тока I_1 , указанную в таблице 3 для Вашего варианта.

ТАБЛИЦА 3. Числовые значения I_1 , I_2 и r :

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I_1(\text{A}) =$	5	10	15	20	-5	-10	-15	-20	5	10	15	20	-20	-15	-10	-5
$I_2(\text{A}) =$	-20	-15	-10	-5	15	5	20	10	-10	-5	-20	-15	5	10	-5	-20

6. Перемещая мышью «руку» вблизи провода, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях r до оси провода, указанных в таблице. Для данного значения r записывайте в таблицу 4 величину магнитной индукции B .

ТАБЛИЦА 4. Результаты измерений и расчетов. (9 столбцов)

	$r \text{ (см)} =$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$1/r, \text{ м}^{-1}$									
$I_1 =$	$B_1, \text{ Тл}$									
$I_2 =$	$B_2, \text{ Тл}$									

- Повторите измерения для значения тока I_2 из таблицы.
- Вычислите и запишите в таблицу 4 значения для второй строки.
- Постройте на одном листе графики зависимости индукции магнитного поля (B_1 и B_2) прямого провода с током от обратного расстояния ($1/r$).
- По тангенсу угла наклона графиков определите магнитную постоянную, используя формулу

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

- Запишите ответы и сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

- Назовите источники магнитного поля. На какие объекты действует магнитное поле?
- Какая величина является силовой характеристикой магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
- Как определить направление вектора магнитной индукции?
- Дайте определение линии индукции магнитного поля.
- Сформулируйте принцип суперпозиции для МП.
- Какие силы действуют между движущимися зарядами?
- Запишите наиболее общее выражение для силы Ампера. Как определить величину и направление силы Ампера?
- Как взаимодействуют два параллельных проводника, если электрический ток в них протекает в одном направлении? В противоположных направлениях?

9. Каким будет наибольшее и наименьшее значение силы, действующей на проводник длиной 2 м, где сила тока 10 А, при различных положениях провода в магнитном поле, индукция которого равна 2 Тл?

10. В магнитное поле (направление выберите сами) внесены два проводника с токами, направления которых противоположные. Определите направление силы Ампера, действующей на каждый проводник.

Лабораторная работа № 5.1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Свободные колебания в RLC контуре».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Определение добротности колебательного контура.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

♦Колебаниями называются движения или процессы, которые повторяются во времени.

Колебания могут иметь различную физическую природу. Например, механические колебания или электромагнитные. Но различные по природе колебательные процессы описываются одинаковыми уравнениями.

♦Колебательная система - система, совершающая колебания.

♦Свободными (или собственными) колебаниями называются колебания, которые совершаются за счет первоначально сообщенной энергии без дальнейшего внешнего воздействия на колебательную систему.

♦Вынужденными колебаниями называются колебания, которые совершаются под действием переменной внешней силы.

♦Гармоническими колебаниями – называются колебания, при которых физическая величина $\xi(t)$ изменяется во времени по закону синуса или косинуса

$$\xi(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad \xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

♦Основные характеристики колебаний

- Период колебаний T (с) – время одного колебания.
- Частота ν ($\text{с}^{-1}=\text{Гц}$) – число полных колебаний в единицу времени

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

- Циклическая (круговая) частота ω (рад/с) – количество полных колебаний за 2π секунд.

Связь частоты и периода колебаний: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.

- Амплитуда колебаний A - максимальное значение колеблющейся величины $\xi(t)$.
- Фаза колебаний $\varphi = (\omega t + \varphi_0)$ определяет положение колеблющейся величины в момент времени t .

- Начальная фаза колебаний φ_0 определяет начальное положение колеблющейся величины в момент времени $t=0$.

♦ Скорость и ускорение гармонически колеблющейся величины $\xi(t)$ также совершают гармонические колебания с той же самой частотой (рис.14). Пусть какая-то физическая величина $\xi(t)$ совершает гармонические колебания по закону косинуса

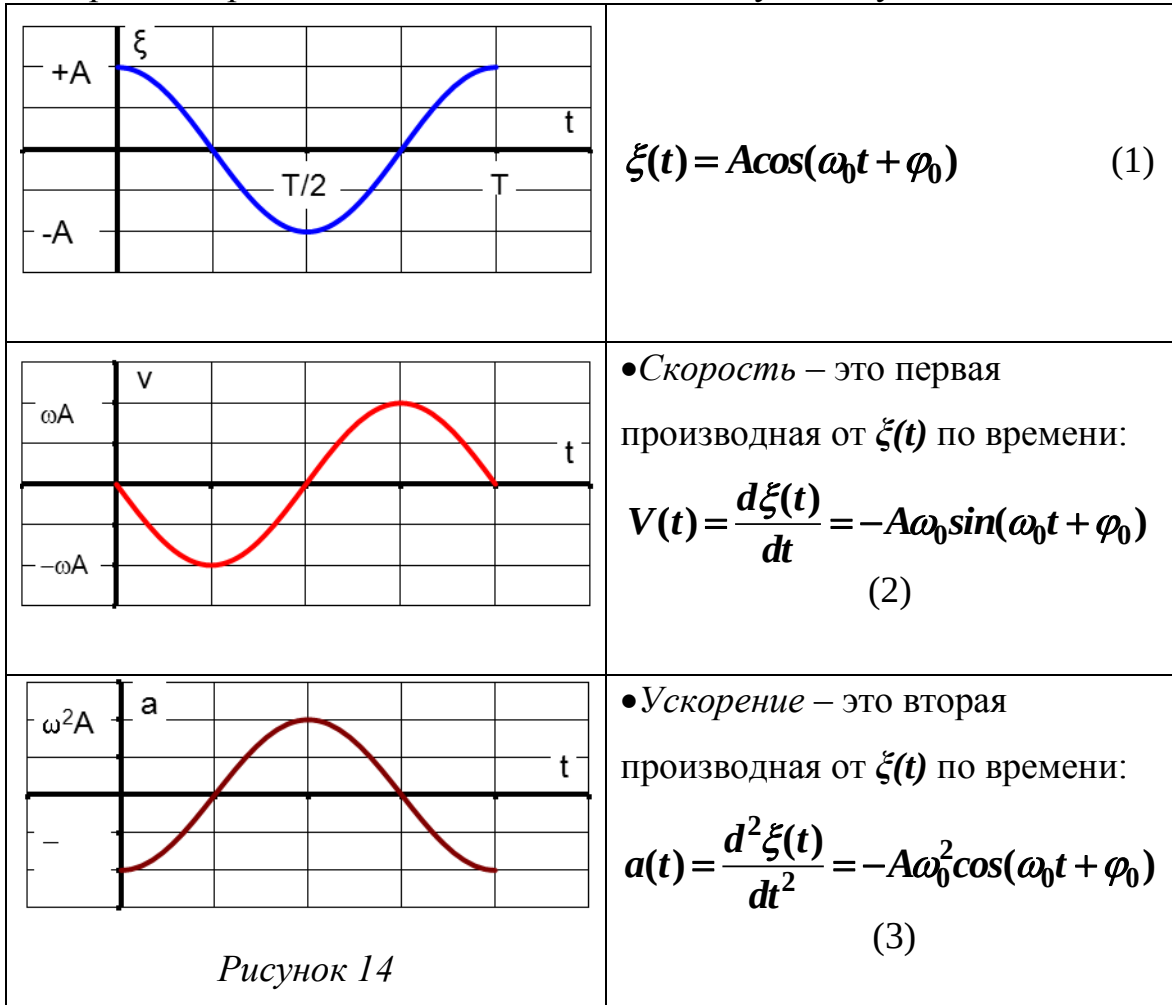


Рисунок 14

♦ Дифференциальное уравнение гармонических колебаний.

Из (1) и (3) видно, что ускорение гармонически колеблющейся величины пропорционально самой величине

$$a(t) = -\omega_0^2 \xi(t).$$

Уравнение

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + \omega_0^2 \xi = 0 \quad (4)$$

называется дифференциальным уравнением гармонических колебаний, поскольку его решениями являются

$$\xi(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad \xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Любые колебания, подчиняющиеся дифференциальному уравнению (4), являются гармоническими с собственной циклической частотой ω_0 . Системы, совершающие колебания, описываемые уравнением (4), называются гармоническими осцилляторами.

Затухающие колебания

♦ Затуханием колебаний называется постепенное ослабление колебаний, вызванное потерей энергии колебательной системой. Если убыль энергии не восполняется за счет работы внешних сил, то колебания будут затухать и называются затухающие колебания. Потери энергии колебаний в механических колебательных системах происходят из-за трения; в электрических – из-за наличия активного сопротивления проводников.

♦ Дифференциальное уравнение затухающих колебаний.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5)$$

$x(t)$ – смещение материальной точки.

β - коэффициент затухания.

Для механических систем $\beta = \frac{r}{2m}$,

где r - коэффициент сопротивления среды.

ω_0 – собственная частота свободных незатухающих колебаний (при $\beta = 0$).

При не слишком большом затухании ($\beta < \omega_0$) решением дифференциального уравнения (5) является гармоническая функция

$$\xi(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

амплитуда
затухающих
колебаний

Из-за потерь энергии амплитуда затухающих колебаний со временем уменьшается (рис.15)

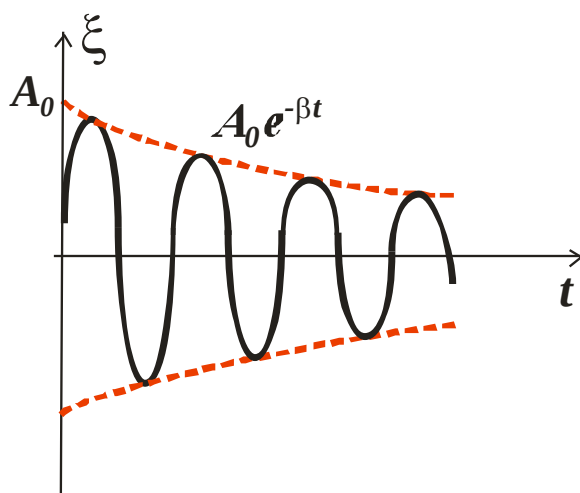


Рисунок 15

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}.$$

$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$ - квадрат частоты затухающих колебаний;

$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ - период затухающих колебаний.

♦ Характеристики затухания.

- $\tau = \frac{1}{\beta}$ - *время затухания (релаксации)* - время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

- $N = \frac{1}{\beta T}$ - *число колебаний*, после которых амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

- $\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta T}$ - *декремент затухания*: отношение значений амплитуд, соответствующих моментам времени, отличающимся на один период.

- $\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$ - *логарифмический декремент затухания*: натуральный логарифм отношения двух соседних амплитуд.

- $Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N$ - *добротность* - безразмерная физическая величина, пропорциональная числу колебаний за время релаксации, и равная произведению величины (2π) на отношение энергии $W(t)$ системы в произвольный момент времени к убыли энергии за один период затухающих колебаний. Добротность показывает, сколько энергии теряется в колебательной системе за период.

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)} \left(\frac{\text{энергия, запасенная в системе}}{\text{убыль энергии за период}} \right).$$

Чем больше добротность колебательной системы, тем меньше затухание, тем дольше будет длиться периодический процесс в такой системе.

Электромагнитные колебания

Электромагнитные колебания — это колебания электромагнитного поля. Колеблющейся величиной $\xi(t)$ является величина заряда $q(t)$.

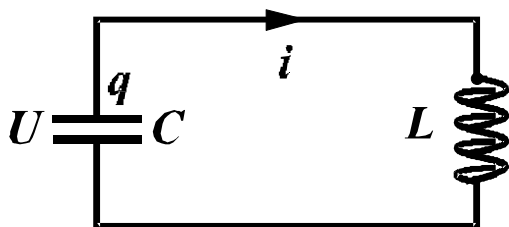


Рисунок 16

♦ Идеальный колебательный контур

- электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора с емкостью C и катушки с индуктивностью L (рис. 16). При электромагнитных колебаниях, происходят периодические изменения электрических и

магнитных величин: заряда q , напряжения U , электрического тока i , напряженности электрического поля E , индукции магнитного поля B .

Для возникновения свободных колебаний систему необходимо вывести из положения равновесия. Для этого нужно зарядить конденсатор. На обкладках конденсатора появятся электрический заряд q , а между обкладками – напряжение U . Под действием напряжения заряды начинают переходить с одной обкладки на другую – в цепи пойдет ток i . По закону Ома для участка цепи, содержащей ЭДС

$$iR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon. \quad (6)$$

ЭДС, действующая в контуре, есть ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon = \varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$$

а $\varphi_1 - \varphi_2 = U = \frac{q}{C}$ - напряжение на конденсаторе. При увеличении тока,

заряд конденсатора уменьшается, поэтому $i = -\frac{dq}{dt}$. Собирая все

вместе в уравнение (6) и учитывая, что в идеальном колебательном контуре сопротивление $R = 0$, получим **дифференциальное уравнение свободных электромагнитных колебаний**

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0. \quad (7)$$

Решением этого уравнения является функция синуса или косинуса:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (8)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ - собственная частота колебаний в контуре.} \quad (9)$$

$$\text{Сила тока} \quad i = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (10)$$

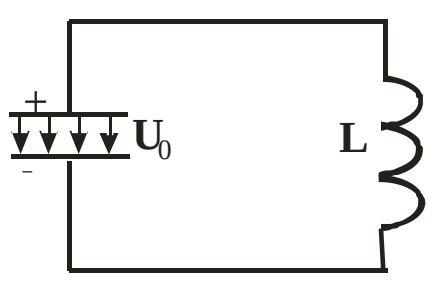
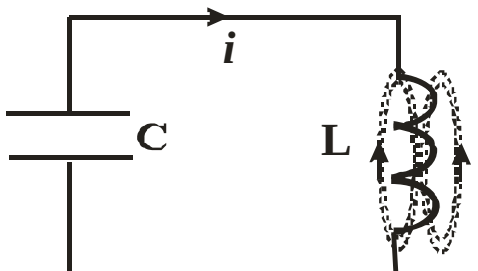
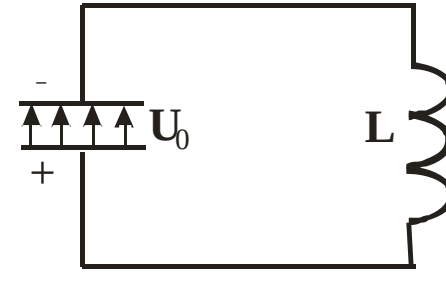
и напряжение на обкладках конденсатора

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (11)$$

также изменяются по гармоническому закону.

♦Превращение энергии при свободных электромагнитных колебаниях.

При электромагнитных колебаниях происходит попеременное превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля.

	В начальный момент времени конденсатор заряжен зарядом q. Вся энергия контура W сосредоточена в энергии электрического поля конденсатора $W_{\text{Э}} = \frac{C \cdot U_0^2}{2}. \quad (12)$
	Затем конденсатор начнет разряжаться и в контуре потечет возрастающий электрический ток. Энергия электрического поля начнет уменьшаться, а энергия магнитного поля катушки возрастать. В момент времени $t = \frac{1}{4}T$ (T – период колебаний) конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля станет равной нулю. Вся энергия контура будет сосредоточена в энергии магнитного поля катушки (13)
Теперь ток в контуре начнет ослабевать, и магнитное поле катушки будет уменьшаться. При этом возникает ток самоиндукции, который, поддерживая убывающий ток, перезаряжает конденсатор. Энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля.	
	К моменту времени $t = \frac{1}{2}T$ конденсатор перезарядится, и энергия контура снова будет равна энергии электрического поля конденсатора $W_{\text{Э}} = \frac{C \cdot U_0^2}{2} \quad (14)$

Затем все процессы в контуре будут протекать в обратном направлении. Поскольку в идеальном контуре потерь энергии нет ($R = 0$), то полная энергия контура сохраняется

$$W = W_{\text{Э}} + W_{\text{М}} = \text{const.}$$

Для электрических систем
$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad (15)$$

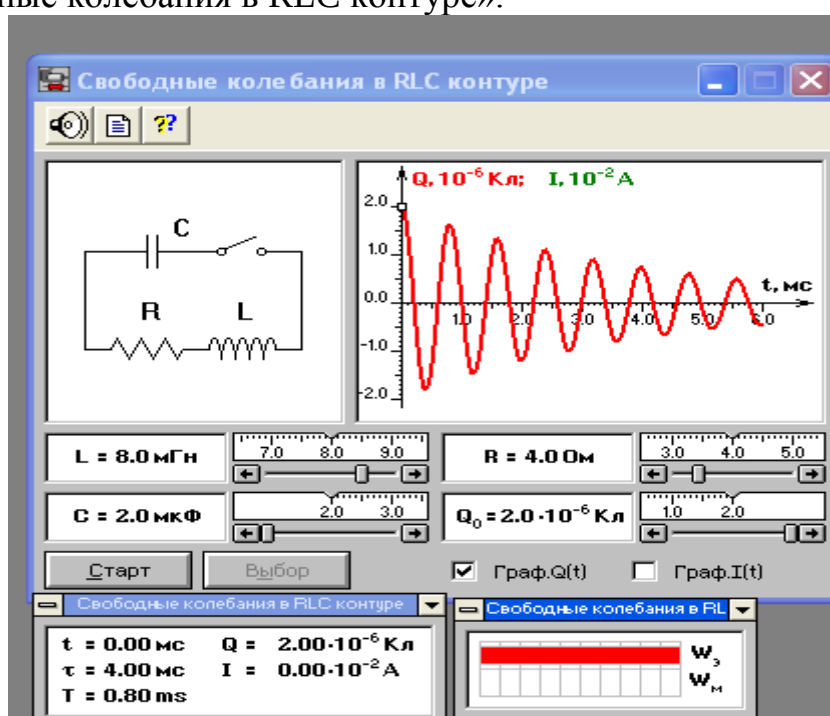
где R – активное сопротивление.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА.

1. Получите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний в колебательном контуре.
2. Запишите формулы, определяющие собственную частоту и период колебаний для колебательного контура.
3. Напишите, чему равны амплитуды колебаний тока и напряжения в контуре.
4. Выпишите формулы для времени затухания колебаний, логарифмического декремента затухания и добротности контура.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Откройте программу, выберите «Электричество и магнетизм» и «Свободные колебания в RLC контуре».



2. Внимательно рассмотрите рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения заряда, емкости, индуктивности, сопротивления.
3. **Протестируйте модель.** Установите значение заряда **2 мкКл**, емкости конденсатора **4 мкФ**, индуктивности катушки **10 мГн**, сопротивления **1 Ом**. Рассчитайте собственную частоту и период колебаний колебательного контура. Сравните рассчитанный период с модельным значением, показанным в нижнем окошечке. Запишите все значения в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели

Колебательный контур ($q_0=2\text{мкКл}$, $C=4\text{мкФ}$, $L=10\text{мГн}$, $R=1\text{ Ом}$)							
	ω , рад/с	T, с	$I_{\max}$, А	β , с ⁻¹	τ , с	λ	Q
Расчет.							
Модел.							

4. Рассчитайте амплитуду колебаний тока в контуре. После чего на экране в рабочем окне отметьте галочкой график тока. Нажав на кнопку «СТОП», остановите процесс в момент, когда ток достигнет своего максимального значения. Сравните модельное значение максимального тока с расчетным. Запишите эти значения в таблицу 1.

5. Рассчитайте характеристики затухания колебаний в контуре:

- 1) коэффициент затухания;
- 2) время затухания;
- 3) логарифмический декремент затухания;
- 4) добротность контура.

Все значения занесите в таблицу 1. Сравните расчетное время затухания с модельным.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям

ТАБЛИЦА 2. Значения емкости и индуктивности.

Вариант	L , мГн	C , мкФ	Вариант	L , мГн	C , мкФ
1	10	2	9	5.8	5.6
2	8	3	10	6.5	6
3	5	4	11	7.5	4.2
4	5.5	5	12	8.5	3.5
5	9.5	2.2	13	9	2.5
6	7.3	3.4	14	8.3	3.7
7	6	4.5	15	7.1	4.3
8	6.2	5.8	16	7.8	5.2

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.

1. Активизируйте окно «Свободные колебания в RLC контуре». Установите значение индуктивности и емкости согласно Вашему варианту (таблица 2). Величину заряда на конденсаторе установите произвольно.

2. Установите сопротивления резистора $R = 1 \text{ Ом}$. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте график зависимости заряда конденсатора от времени. Измерьте линейкой значения первых четырех - пяти амплитуд и запишите их в таблицу 3. В последнюю строчку таблицы 3 запишите время t , при котором измерена соответствующая амплитуда.

3. Меняя сопротивление R , повторите измерения амплитуд и заполните таблицу 3.

**ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений при $C = \underline{\hspace{1cm}}$ мкф,
 $L = \underline{\hspace{1cm}}$ мГн, $T = \underline{\hspace{1cm}}$ мс.**

R Ом	A₁ мм	A₂ мм	A₃ мм	A₄ мм	A₅ мм	τ, мс	β, с⁻¹		λ		Q
1											
2											
3											
4											
5											
6											
t, мс											

4. Рассчитайте значения периода колебаний и запишите в заголовке таблицы 3.

5. Постройте на одном чертеже графики зависимостей амплитуды колебания A от времени t (6 линий, соответствующих разным R).

6. Для каждого графика соедините прямой линией значения первых двух амплитуд A_1 и A_2 . Продолжите прямую до пересечения с осью абсцисс. Точка пересечения определяет величину времени затухания τ . Запишите это значение в таблицу 3. Рассчитайте величины коэффициента затухания

$$\beta = 1/\tau \quad \text{и} \quad \beta = R/2L.$$

Запишите их в таблицу 3.

7. Для каждого значения сопротивления вычислите логарифмический декремент затухания по формулам

$$\lambda = T/\tau \quad \text{и} \quad \lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}$$

и добротность контура. Запишите в таблицу 3.

8. Сделайте вывод по результатам работы.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что такое колебательный контур? Какая физическая величина испытывает колебания в колебательном контуре?

2. Запишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний для колебательного контура.
3. Сравните колебательный контур с колебательной системой - груз на пружинке. Установите аналогию между величинами, характеризующими эти колебания.
4. Опишите превращения энергии при электрических гармонических колебаниях в контуре.
5. Какие колебания называются затухающими?
6. Запишите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний. Изобразите график затухающего колебания.
7. Приведите схему колебательного контура для затухающих электромагнитных колебаний
8. Перечислите и дайте определения характеристик затухания.
9. Что определяет добротность?

Выполните следующее дополнительное задание.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.

Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью $C=10^{-5}\text{Ф}$. Максимальное напряжение конденсатора U_0 . Числовые значения L и U_0 задаются для каждого варианта в таблице 4:

ТАБЛИЦА 4. Числовые значения индуктивности и напряжения.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$L(\cdot 10^{-3}\text{Гн})$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	3,0
$U_0\text{ (В)}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

- 1) Определить период и циклическую частоту колебаний тока, заряда и напряжения.
- 2) Определить максимальные значения силы тока и заряда.
- 3) Определить максимальную энергию электрического поля конденсатора и максимальную энергию магнитного поля катушки.

Лабораторная работа № 6.1

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ОПЫТ ЮНГА

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Оптика» и «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:

Интерференция - это одно из основных свойств волн любой природы: упругих, электромагнитных, в том числе и световых.

♦ *Интерференцией волн называется явление усиления колебаний в одних и ослабления колебаний в других точках пространства в результате наложения двух или нескольких когерентных волн, приходящих в эти точки пространства.*

Для наблюдения устойчивой во времени интерференционной картины необходимо, чтобы *разность фаз, частоты и поляризация* интерферирующих волн оставались *постоянными* в течение всего времени наблюдения. Это возможно, если интерферируют когерентные, монохроматические волны.

♦ *Когерентные волны* - волны одинаковой частоты, колебания в которых отличаются *постоянной* разностью фаз, не изменяющейся со временем.

♦ *Монохроматические волны* — волны с постоянной во времени частотой, амплитудой и начальной фазой.

Любые два естественных источника света не являются когерентными. Когерентные световые волны получают, разделив волну от одного источника на две. Образование интерференционной картины можно наблюдать, например, в опыте Юнга (рис.17а), в котором свет, пройдя через узкую длинную щель S , падает на экран с двумя близко расположенными щелями S_1 и S_2 . Эти щели действуют как вторичные когерентные источники. Проходя через каждую из щелей, световой пучок уширяется вследствие [дифракции](#). В области перекрытия световых пучков наблюдается интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос (рис.17б). Измеряя ширину интерференционных полос, Юнг в 1802 г. впервые определил длины световых волн для разных цветов, хотя эти измерения и не были точными.

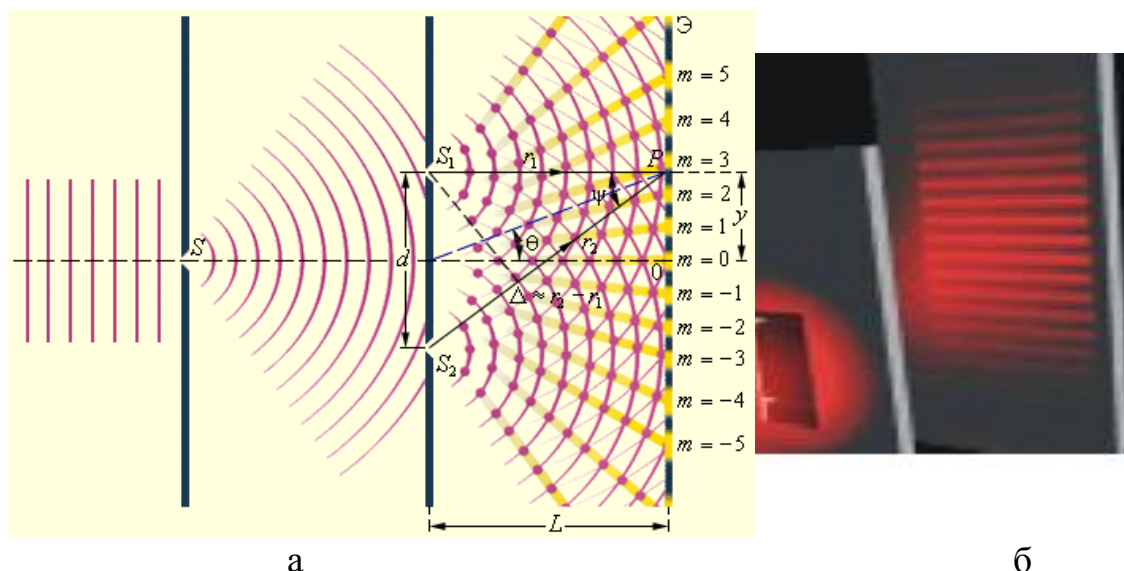


Рисунок 17. Схема опыта Юнга.

В качестве простейшего примера рассмотрим интерференцию от двух когерентных точечных источников S_1 и S_2 , расположенных на расстоянии d друг от друга и испускающих гармонические бегущие волны одинаковой частоты (рис.18). Вторичные волны, испускаемые

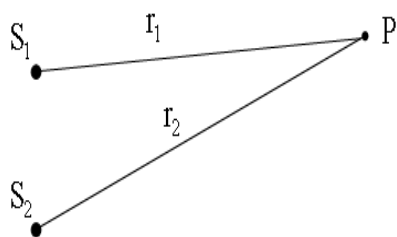


Рисунок 18

источниками S_1 и S_2 , находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения P разные расстояния r_1 и r_2 (r_1 и r_2 - геометрическая длина пути первой и второй волны до точки наблюдения P). Результат интерференции двух волн в некоторой точке P на экране, удаленном на расстояние L от источников, зависит от разности хода лучей (волн).

Т.к. мы имеем две световых волны, то в точке наблюдения P каждая световая волна возбуждает свое гармоническое колебание:

$$E_1(r_1, t) = E_{1\max} \cos(\omega t - kr_1) \quad (1)$$

$$E_2(r_2, t) = E_{2\max} \cos(\omega t - kr_2) \quad (2)$$

Амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний одинаковой частоты и одинакового направления находится по формуле:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos[kr_2 - kr_1] \quad (3)$$

Результирующая интенсивность световой волны в точке наблюдения, пропорциональная квадрату амплитуды E^2 ($I \sim E^2$), будет равна:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cdot \cos(\delta\varphi) \quad (4)$$

$$\delta\varphi = kr_2 - kr_1 = k(r_2 - r_1) \quad (5)$$

где $\delta\varphi$ - разность фаз колебаний, возбуждаемых в точке

наблюдения источниками S_1 и S_2 ,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - это волновое число,

$r_2 - r_1 = \Delta$ - геометрическая разность хода лучей.

Тогда

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (6)$$

Если распространение света происходит в среде с показателем преломления n , то величина, равная $n \cdot r = L$ называется *оптической длиной пути*, а

$$n_2 r_2 - n_1 r_1 = L_2 - L_1 = \Delta \quad - \text{оптическая разность хода}$$

Если волны распространяются в воздухе, то $n_1 = n_2 = 1$, тогда геометрический и оптический пути совпадают. Величина $\Delta = r_2 - r_1$ называется *разностью хода волн*.

Из выражения (4) видно, что, если источники не когерентны (разность фаз не постоянна), $\cos\delta\varphi$ будет менять знак и среднее значение косинуса будет равно нулю. И результирующая интенсивность везде будет равна просто сумме исходных интенсивностей $I = I_1 + I_2$. Если же источники когерентные (разность фаз постоянна), то, в зависимости от знака косинуса, результирующая интенсивность может быть как меньше, так и больше суммы исходных. Если $\cos\delta\varphi = +1$, то в таких точках пространства

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2},$$

то есть будет наблюдаться максимум интенсивности. Это выполняется, если

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = 2m\pi \quad \text{или если} \\ \Delta = m\lambda = 2m \frac{\lambda}{2} \quad \text{где } (m=0,1,2,3,\dots) \quad (7)$$

Иначе говоря, если в разности хода лучей укладывается *чётное число полуволн (целое число длин волн)*, то в таких точках наблюдения будет *максимум* света.

Аналогично, для получения минимума интенсивности в точках наблюдения, необходимо, чтобы $\cos \delta\varphi = -1$, а, следовательно, условием **минимума** будет условие, когда в разность хода лучей будет укладываться *нечётное число полуволн*.

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

Еще одним явлением, подтверждающим волновую природу света, является **дифракция**. Между явлениями интерференции и дифракции нет существенного физического различия. Причина дифракции, как и интерференции, - суперпозиция волн, которая приводит к перераспределению интенсивности. Если число интерферирующих источников конечно (два или несколько), принято говорить об интерференции. При непрерывном распределении источников (число когерентных источников бесконечно) говорят о дифракции волн. Дифракция света всегда сопровождается интерференцией дифрагированных лучей.

♦ **Дифракцией** называют процесс отклонения света от прямолинейного распространения вблизи препятствий, размеры которых сравнимы с длиной волны.

Проникновение световых волн в область геометрической тени (явление дифракции) осуществляется на основе **принципа Гюйгенса-Френеля**. В соответствии с этим принципом каждая точка волновой поверхности является вторичным источником сферической волны (рис.19). Огибающая этих вторичных волн является новым волновым фронтом. Френель дополнил принцип Гюйгенса предложением определять амплитуду результирующей волны в любой точке пространства как результат интерференции всех вторичных волн, с учетом их фаз и амплитуд.

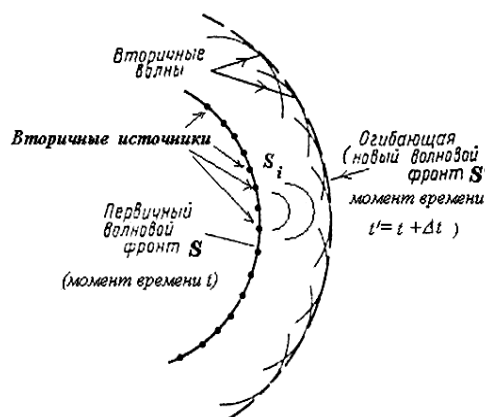


Рисунок 19

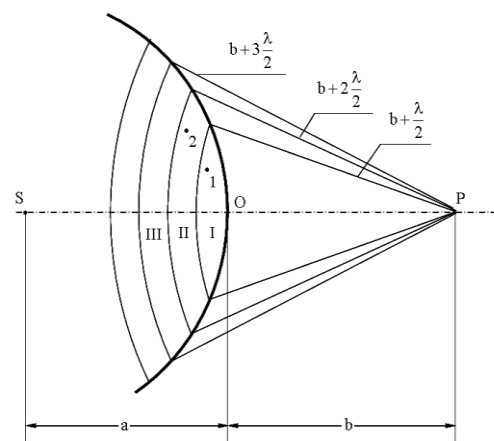


Рисунок 20

Для упрощения расчетов интерференции вторичных волн Френель предложил разбить фронт падающей волны в месте расположения преграды на кольцевые зоны (зоны Френеля). Фронт

волны разбивается на зоны (рис.20) так, чтобы во-первых, площади зон были приблизительно равны, и, во-вторых, расстояния от краев соседних зон до точки наблюдения P должны отличаться на половину длины волны $\lambda/2$. При этом колебания от соседних зон будут приходить в точку наблюдения в противофазе и, следовательно, будут гасить друг друга.

Можно показать, что радиус зоны Френеля с номером m при не очень больших m для сферической волны равен:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}$$

где расстояние a - примерно равно расстоянию от источника до преграды, расстояние b - от преграды до точки наблюдения P .

Если на пути волны поставить непрозрачный экран с отверстием, оставляющим открытой только центральную зону Френеля, то амплитуда в точке P будет равна A_1 , т.е. в 2 раза превзойдет амплитуду, создаваемую в точке P всей сферической волновой поверхностью. Т.к. интенсивность световой волны I прямо пропорциональна A^2 (квадрату амплитуды), то интенсивность света в точке P будет в 4 раза больше, чем при отсутствии преград между источником света и точкой P на экране.

Различают два вида дифракции: дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера. Дифракция Френеля - дифракция в сходящихся лучах, когда на препятствие падает сферическая волна, и экран находится на конечном расстоянии от него. Дифракция Фраунгофера - дифракция в параллельных лучах, когда на препятствие падает плоская волна, и экран находится бесконечно далеко от него.

Если щель открывает малую долю центральной зоны Френеля ($m \ll 1$), то наблюдается дифракция Фраунгофера. Если открывает небольшое число зон Френеля ($m \sim 1$), то на экране получается изображение щели, обрамленное по краям отчетливо видимыми светлыми и темными полосами. В случае, когда щель открывает большое число зон Френеля ($m \gg 1$) на экране получается равномерно освещенное изображение щели.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Получите расчетные формулы для выполнения лабораторной работы при решении следующей задачи.

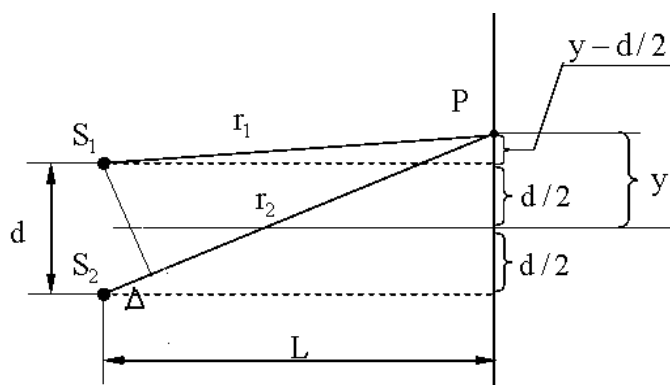


Рисунок 18

Даны два когерентных источника S_1 и S_2 . Расстояние между источниками d , расстояние от источников до экрана - L , $\Delta = r_2 - r_1$ - геометрическая разность хода лучей от источников до произвольной точки P , расположенной на экране (рис.18).

Определите расстояние y от центра интерференционной картины до произвольной точки P . Учтите, что $r_1 + r_2 \approx 2L$, поскольку обычно $d \ll L$ ($L/d \sim 10^3$).

Рассчитайте положение максимумов y_{max} и минимумов y_{min} при интерференции от двух источников, учитывая условие интерференционного максимума (7) и минимума (8).

Рассчитайте ширину интерференционной полосы, то есть расстояние между соседними максимумами Δy_{max} и минимумами Δy_{min} . Сравните эти выражения.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

1. Выберите «Оптика» и «Интерференционный опыт Юнга».
2. Внимательно рассмотрите окно опыта. Найдите регуляторы с движками, задающими длину волны λ и расстояние между щелями d .
3. Протестируйте модель - убедитесь, что модель работает в соответствии с формулами, полученными Вами в задании для допуска. Для этого выберите следующие значения параметров модели: длину волны $\lambda = 500$ нм, расстояние между щелями $d = 3,0$ мм.

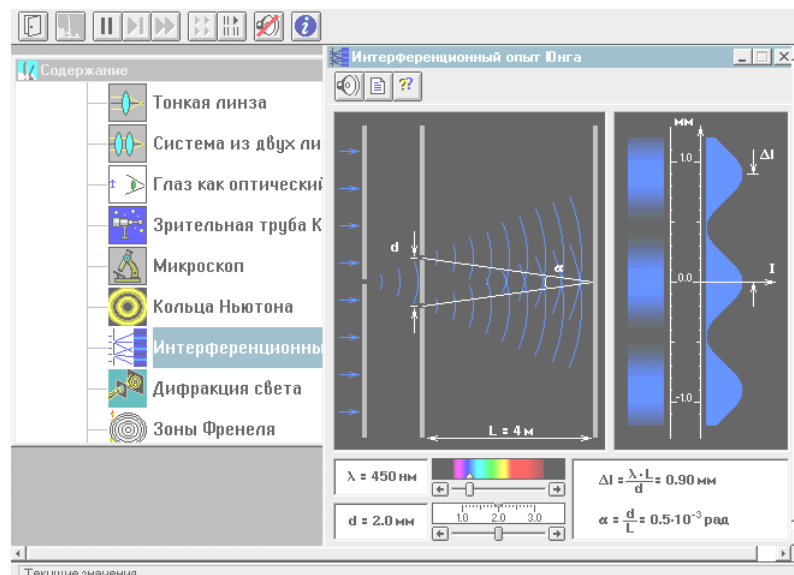
Рассчитайте положение первого и второго максимумов, используя формулу, полученную при выполнении задания для допуска:

$$y_{max} = m\lambda L / d$$

. Измерьте с помощью шкалы в окне опыта расстояние от центра интерференционной картины до первого y_{max1} и второго максимумов y_{max2} . Сравните измеренные значения с расчетными.

ТАБЛИЦА для тестирования модели.

$\lambda = 500 \text{ нм}$	$d = 3,0 \text{ мм}$	Расчетные значения	
		$y_{\max 1} =$	$y_{\max 2} =$
		Измеренные значения	
		$y_{\max 1} =$	$y_{\max 2} =$



Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.

ТАБЛИЦА 1. Исходные параметры опыта (не перерисовывать)

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\lambda_1, \text{ нм}$	380	385	390	395	400	405	410	415	430	435	440	445	450	455	460	465
$\lambda_2, \text{ нм}$	477	482	491	499	507	511	515	532	537	615	575	495	593	502	526	544

ТАБЛИЦЫ 2,3. Результаты измерений и расчётов для $\lambda =$ _____ нм.

d [мм]	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
$y_{\max}$ [мм]											
$1/d$ [м ⁻¹]											

4. Установите первое значение длины волны λ_1 для Вашего варианта и максимальное значение расстояния между щелями $d = 3.0 \text{ мм}$. Зарисуйте рисунок.

5. Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние $y_{\max}$ между нулевым и первым максимумами и запишите в таблицу 2.

6. Уменьшая d каждый раз на 0.2 мм, измерьте остальные значения расстояния $y_{\max}$.

7. Установите второе числовое значение длины волны λ_2 из таблицы 1 для Вашего варианта, повторите измерения по п.п.2-4, записывая результаты в таблицу 3.

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

9. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей смещения первого максимума y_{max} от обратного расстояния между щелями $1/d$ (указав на них длину волны λ).

10. Для каждого графика из наклона графиков определите экспериментальное значение произведения λL , используя формулу:

$$\lambda L = \frac{\Delta(y_{max})}{\Delta(\frac{1}{d})}.$$

11. Рассчитайте для каждого графика значение экспериментально полученного расстояния L_i от щелей до экрана. Рассчитайте среднее значение расстояния L . Оцените абсолютную ошибку измерений.

12. Проанализируйте полученный результат. Сделайте выводы.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Дайте определение когерентных волн.
2. Дайте определение явления интерференции.
3. Дайте определение явления дифракции.
4. Что такое волновая поверхность?
5. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
6. Дайте определение зон Френеля.
7. Что такое когерентные источники света?
8. В чем заключается явление интерференции световых лучей?
9. Что такое оптическая длина пути?
10. Какому условию должна удовлетворять разность хода между интерферирующими лучами для наблюдения в заданной точке максимума (минимума) интенсивности?
11. Какому условию удовлетворяют интерференционные максимумы и минимумы в опыте Юнга?
12. Что такое разность хода двух гармонических волн, излучаемых двумя источниками.
13. При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается максимум? При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается минимум?

Выполните следующее дополнительное задание

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом длиной волны λ , расстояние между отверстиями d и расстояние от отверстий до экрана L .

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
λ , нм	380	390	400	410	420	430	450	460	470	480	490	500	510	520	530
d , мм	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
L , м	4	4	4	4	3.5	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3	4.5	4.5	4.5

Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
λ , нм	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680
d , мм	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
L , м	4	4	4	4	3.5	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3	4.5	4.5	4.5

- 1) Найти положение трех первых светлых полос относительно нулевой.
- 2) Определить расстояние Δx между светлыми полосами на экране в средней части интерференционной картины.
- 3) Определить, на сколько изменится ширина интерференционных полос, если длина волны монохроматического света увеличится на 100 нм.
- 4) В опыте Юнга вначале берется свет с длиной волны λ_1 (из Вашего варианта), а затем λ_2 . Какова длина волны во втором случае, если 1-я светлая полоса в первом случае совпадает со 2-й светлой во втором?

Лабораторная работа № 6.2 ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Откройте программу "Открытая физика", выберите «Квантовая физика» и «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:

Действие света на вещество состоит в том, что свет передает веществу энергию, приносимую световой электромагнитной волной. Эта энергия частично превращается в тепло, повышая температуру поглощающего свет тела, а частично переходит в другие виды энергии, вызывая ряд разнообразных явлений. Действие света на вещество может быть механическим - давление света на тело, химическим - возбуждение различных химических реакций (нр. фотосинтез), фотоэлектрическим - фотоэффект. Различают внешний, внутренний и вентильный фотоэффекты.

♦ **Внутренний фотоэффект** - это повышение электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении. Под действием электромагнитного излучения электроны внутри полупроводника переходят из связанных состояний в свободные без вылета наружу, образуя дополнительные носители тока и увеличивая проводимость полупроводника или диэлектрика.

♦ **Вентильный фотоэффект** - разновидность внутреннего фотоэффекта – возникновение ЭДС при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла. Вентильный фотоэффект используется в солнечных батареях для преобразования солнечной энергии в электрическую/

♦ **Внешний фотоэффект** (фотоэлектронная эмиссия) - это явление испускания с поверхности твердых или жидких тел электронов под действием электромагнитного излучения.

Обнаруживается и измеряется внешний фотоэффект по фототоку - току электронов, выходящих из облучаемого светом вещества в другую среду (обычно в вакуум).

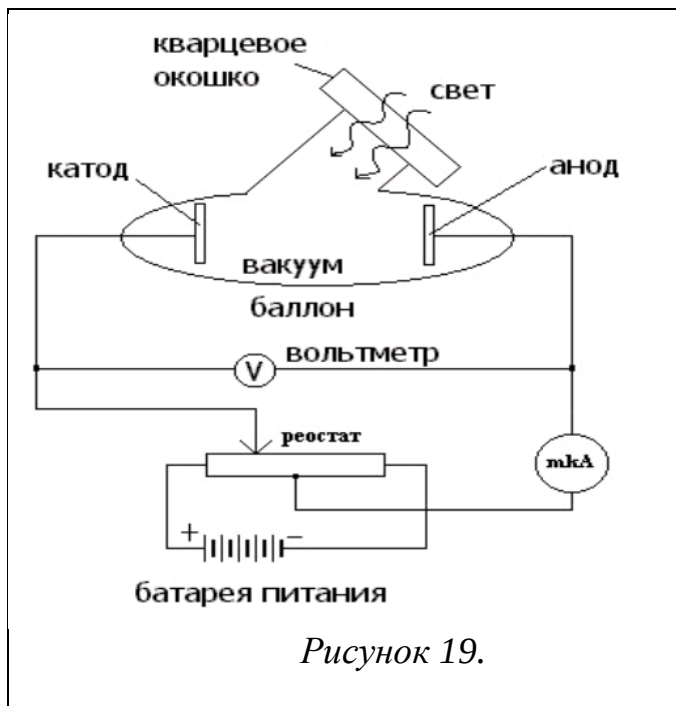


Рисунок 19.

Фотоэффект был подробно исследован в 1888-1890 годы русским ученым А. Г. Столетовым и несколько позже - немецким ученым Ф. Ленардом. На рисунке 19 изображена установка, позволяющая детально изучать фотоэффект.

Электроды, **фотокатод** и **анод**, помещены в **баллон**, из которого откачан воздух. Свет на фотокатод подается через **кварцевое окошко**. Кварц, в отличие

от стекла, хорошо пропускает ультрафиолетовые лучи. Разность потенциалов (напряжение) между фотокатодом и анодом измеряет **вольтметр**. Ток, возникающий при освещении катода, измеряется **миллиамперметром**. Батарея питания подключена так, что можно изменять не только значение, но и знак подаваемого напряжения.

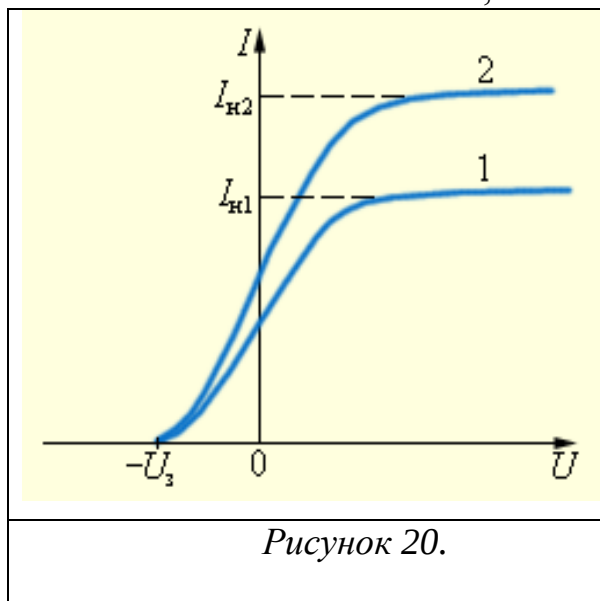


Рисунок 20.

Зависимость фототока I электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения U между катодом и анодом называется **ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ФОТОЭФФЕКТА**. Вольтамперная характеристика (ВАХ) установки по изучению фотоэффекта позволяет получить информацию об энергии электронов, испускаемых фотокатодом.

При освещении светом, частота ν которого достаточна для возникновения фотоэффекта, ВАХ имеет вид графика, изображенного на рисунке 20. При увеличении напряжения фототок постепенно нарастает и при некотором положительном значении напряжения достигает насыщения. При этом все электроны, испущенные фотокатодом, достигают анода. При $U=0$ только часть электронов долетает до анода и создает фототок I_0 . Чтобы фототок прекратился, необходимо приложить **запирающее напряжение** - $U_{зан}$ - (анод отрицательный, а катод положительный).

При этом значении напряжения даже фотоэлектроны, вылетевшие из катода с максимальной кинетической энергией $(mv_{\max}^2)/2$, не могут преодолеть задерживающее поле. Их энергия полностью расходуется на совершение работы против сил электрического поля. Таким образом, измерив запирающее напряжение $U_{\text{зан}}$, можно определить максимальную скорость фотоэлектронов сразу после вылета из фотокатода.

$$eU_{\text{зан}} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

В этой формуле m - масса электрона; $v_{\max}$ - его максимальная скорость у фотокатода; e - абсолютное значение заряда электрона.

При исследовании фотоэффекта в зависимости от свойств света, падающего на катод, были установлены следующие закономерности (**законы фотоэффекта**):

1. Фотоэффект практически безинерционен: вылет электронов из металла начинается практически одновременно с началом его освещения.

2. Вырванные светом электроны имеют различные значения кинетической энергии - от самых малых до некоторого максимального значения $E_{\text{кин}}$. Эта максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов растет линейно при возрастании частоты ν падающего на катод света, но не зависит от интенсивности света

3. Число фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени, прямо пропорционально интенсивности падающего света.

4. Не всякий свет вырывает электроны из металла. Для каждого металла существует определенная наименьшая частота $\nu_{\min}$ (наибольшая длина волны $\lambda_{\max}$), такая, что свет меньшей частоты (большей длины волны) вовсе не вырывает электронов. Эта наименьшая частота (наибольшая длина волны) называется **красной границей фотоэффекта**.

Таким образом, главную роль почему-то играет частота света, которая определяет его цвет, но не имеет никакого отношения к энергии волны. Волновая теория света не в состоянии объяснить законы фотоэффекта. **Проблема фотоэффекта** состояла в том, что теоретические предсказания, сделанные для фотоэффекта на основе электродинамики Максвелла, противоречили результатам опытов. Теория Максвелла предсказывала, что энергия, передаваемая световой волной электрону, должна быть пропорциональна интенсивности света. Кроме того, в классической электродинамике нет никаких объяснений прямой пропорциональности кинетической энергии электронов частоте света ν .

Объяснение всех законов фотоэффекта оказалось возможным лишь в рамках квантовой теории. Эйнштейн предположил, что свет частотой ν не только испускается отдельными квантами (согласно

гипотезе Планка), но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $h\nu$ ($h = 6,6246 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка). Кванты электромагнитного излучения, движущиеся со скоростью распространения света в вакууме, называются **фотонами**.

Эйнштейн предложил рассматривать фотоэффект как неупругое соударение частицы «фотон» с частицей «электрон». При этом выполняется закон сохранения энергии: фотон полностью отдает электрону свою энергию $h\nu$, которая затрачивается на работу выхода $A_{\text{выхода}}$ электрона из материала и на сообщение электрону кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{выхода}} + \frac{m_e V^2}{2} \quad \text{— уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.}$$

Уравнение Эйнштейна позволяет объяснить законы фотоэффекта.

Согласно квантовой теории фотоэффект состоит в том, что световые частицы, сталкиваясь с электронами металла, передают им свою энергию и импульс (сами фотоны при этом исчезают). Если энергия фотонов падающего света больше той работы, которую электрон должен совершить против сил притяжения к положительно заряженным частицам вещества, электрон может вылететь из металла. Если энергия фотонов меньше этой работы (работы выхода электрона из металла), ни один электрон из металла не вылетит.

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта следует, что если энергия фотона $h\nu$ меньше работы выхода A , то фотоэффект невозможен. Граничная частота определяется равенством:

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{вых}}$$

Здесь $\nu_{\text{кр}}$ - **красная граница фотоэффекта**.

Соответствующая частоте $\nu_{\text{кр}}$ длина волны также называется красной границей фотоэффекта, т.к. $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то для $\lambda_{\text{кр}}$ имеем:

$$h \frac{c}{\lambda_{\text{кр}}} = A_{\text{вых}}$$

Название "красная граница" связано с тем, что длинноволновая часть видимого спектра, для которой максимальна длина волны λ и минимальна энергия фотонов, имеет красный цвет.

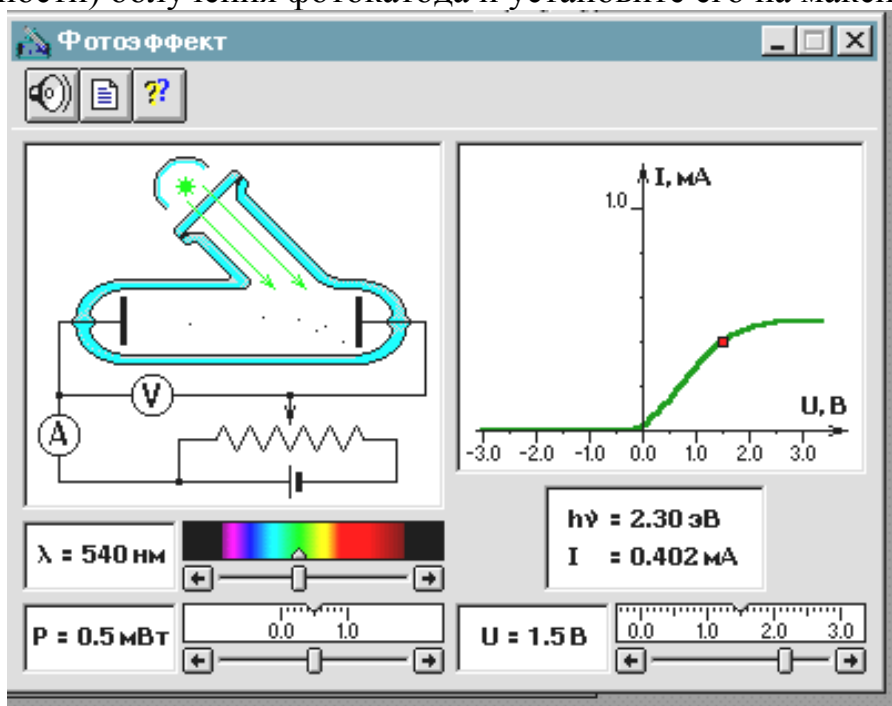
Число вылетевших с поверхности катода фотоэлектронов, определяющее силу тока насыщения, пропорционально числу падающих на катод квантов, т.е. интенсивности света. Чем больше падающих фотонов, тем больше выбитых электронов.

Объясняется и безынерционность фотоэффекта: как только появляются кванты с необходимой энергией, сразу же появляются и выбитые ими электроны.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Откройте программу, выберите «Квантовая физика» и «Фотоэффект».

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



Аналогичным образом установите нулевое напряжение U между анодом и фотокатодом и минимальную длину волны ЭМИ. Наблюдайте движение электронов в фотоэлементе, медленно изменяя напряжение до прекращения фототока (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что практически все электроны долетают до анода и после этого движутся обратно к катоду).

ТАБЛИЦА 1. Начальные параметры.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\lambda, \text{нм}$	370	450	390	400	380	520	420	440	460	480	500	430	510	490	410

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФОТОТОКА ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. Установите $U=0$, $P=1,0$. Найдите длину волны света, при которой значение фототока максимально.
2. Изменяя интенсивность излучения с помощью движка регулятора мощности облучения фотокатода, снимите зависимость силы фототока I_ϕ от интенсивности излучения P .
3. Постройте график полученной зависимости силы фототока I_ϕ от интенсивности излучения P .

ЗАДАНИЕ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАСНОЙ ГРАНИЦЫ ФОТОЭФФЕКТА И РАСЧЕТ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА.

4. Установите интенсивность (мощность) излучения $P_1=P_0=\max$. Изменяя длину волны света в пределах от 400 нм до 720 нм, через каждые 20 нм измерьте при помощи микроамперметра силу фототока и данные занесите в таблицу. Зависимость силы I_ϕ фототока от длины волны λ снимите также для интенсивностей $P_2=0,5$ и $P_3=0,2$ (от максимальной интенсивности).
5. Постройте графики зависимости I_ϕ от λ на одном чертеже. Для каждой кривой найдите длину волны λ_i , лежащую на длинноволновом спаде кривой, для которой величина фототока составляет 3-5% от максимальной. Красная граница фотоэффекта $\lambda_{кр}$ определяется как средняя арифметическая величина от найденных значений λ_i .

6. При помощи формулы
$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A_{вых}}$$

рассчитайте работу выхода электрона из покрытия фотокатода.

ЗАДАНИЕ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА.

7. Для более точного определения связи запирающего напряжения $U_{зАП}$ с длиной волны λ падающего излучения сначала установите значение запирающего напряжения $U_{зАП1}$ в соответствии с таблицей 2. Мощность излучения максимальна.

ТАБЛИЦА 2. Значения запирающего напряжения.

Вариант	$U_{зАП1}, В$	$U_{зАП2}, В$	$U_{зАП3}, В$	$U_{зАП4}, В$
1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9
3	-0,3	-0,5	-0,7	-1,0
4	-0,4	-0,7	-0,8	-1,1

8. Перемещая движок регулятора длины волны, 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).

9. Значения λ и $U_{зАП}$ занесите в таблицу 3. Прodelайте то же самое для трех других значений $U_{зАП}$.

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений $\lambda_{кр} =$ _____ нм

	1	2	3	4
$U_{зАП}, В$				
$\lambda, нм$				
$1/\lambda, нм^{-1}$				
	1-4	2-3	1-3	4-2
$h, Дж \cdot с$				
$A_{ВЫХ}, Дж$				

10. Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн.

11. Постройте график зависимости запирающего напряжения ($U_{зАП}$) от обратной длины волны ($1/\lambda$).

12. Определите постоянную Планка, используя график и формулу

$$h = \frac{e}{c} \frac{\Delta(U_{зАП})}{\Delta(\frac{1}{\lambda})} .$$

13. Используя длину волны красной границы фотоэффекта, полученную в задании 2, вычислите значение работы выхода материала фотокатода (в эВ) ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

14. Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

ТАБЛИЦА 3. Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{ВЫХ}, \text{эВ}$	2.2	2.3	6.3	2.1	4.7	2.0	4.0

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что такое фотоны?
2. Назовите все модели электромагнитного излучения.
3. Напишите формулу энергии фотона. Как связана энергия фотона и его масса.
4. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
5. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
6. Опишите по шагам, что происходит с фотоном, падающим на границу металла.

7. Опишите по шагам, что происходит со свободным электроном металла, после его взаимодействия с фотоном.
8. Опишите, что происходит с электроном, входящим в состав атома металла, после его взаимодействия с фотоном.
9. Что такое работа выхода? Чья это характеристика?
10. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
11. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
12. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода.
13. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода ниже потенциала фотокатода?
14. Как связана кинетическая энергия электрона у катода с его потенциальной энергией а анода и почему?
15. Какая величина определяет число электронов, вырываемых в единицу времени с поверхности катода в фотоэлементе?
16. Как изменяется скорость фотоэлектронов при увеличении интенсивности светового потока, падающего на металл?
17. Фотокатод освещается монохроматическим источником света. От чего зависит величина фототока насыщения?
18. При изменении частоты света, падающего на фотоэлемент, задерживающая разность потенциалов увеличилась в 1,5 раза. Как изменилась максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов?
19. Как была изменена частота света, если максимальная скорость электронов при фотоэффекте возросла в 2 раза? Работой выхода электронов из металла пренебречь.
20. Какие данные достаточно знать, чтобы определить красную границу фотоэффекта?
21. Длина волны красной границы фотоэффекта для некоторого вещества равна 0,65 мкм. Для каких из перечисленных ниже длин волн будет наблюдаться фотоэффект?
 А- 0,50 мкм; Б- 0,75 мкм ; В- фотоэффект будет наблюдаться в обоих случаях; Г- фотоэффект не будет наблюдаться в обоих случаях; Д- ответ зависит от рода вещества

Выполните следующее дополнительное задание

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ. Монохроматический свет с длиной волны λ освещает металлическую пластинку, падая перпендикулярно на ее поверхность. Работа выхода электронов из металла пластинки $A_B = 2 \cdot 10^{-19}$ Дж. Мощность падающего излучения $P = 100$ Вт.

Скорость света в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Постоянная Планка: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Масса электрона: $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Числовые значения λ задаются для каждого варианта:

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
λ, нм	300	320	340	360	380	520	420	440	460	480	500	280	260	240	220
Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
λ, нм	210	230	250	270	510	490	470	450	430	410	390	370	350	330	310

♦ **Определить:**

- 1) кинетическую энергию $E_{кин}$ и скорость v выбитых электронов.
- 2) число фотонов n , падающих на поверхность пластины в **1** секунду.
- 3) импульс p , передаваемый пластинке фотонами за **1** секунду, и силу $F_{ср}$ давления света на пластинку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа -2003. - 293с.
2. Грабовский Г.Н. Курс физики. СПб.: Изд-во «Лань»- 2004.- 607с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа - 2005. - 607с.
4. Трофимова Т.И. Физика в таблицах и формулах. М.: Дрофа -2010. - 432с.
5. Конкин Б.Б., Сафронов В.П. Пособие по физике. Часть первая. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Ростов н/Д. - 2004. - 47с.

Приложение 1 Справочные данные

Некоторые физические константы

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9.81	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6.02 \cdot 10^{23}$	моль^{-1}
Универсальная газовая постоянная	R	8.31	$\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	Дж·с

Приставки и множители

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	10^1
гекто	г	10^2
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	10^{-1}
санти	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}

Греческий алфавит

α - альфа, β - бета, γ - гамма, Δ, δ - дельта, ϵ - эпсилон
 ζ - дзета, η - эта, θ - тэта, ι - нота, κ - каппа
 λ - лямбда, μ - мю, ν - ню, ξ - кси, $\omicron$ - омикрон
 π - пи, ρ - ро, Σ, σ - сигма, τ - тау, ϕ - фи
 χ - хи, Ψ, ψ - пси, Ω, ω - омега .

Приложение 2. Титульный лист отчета
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

- филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

Кафедра МиЕНД

Лабораторная работа №__
(Название)

Выполнил:
студент группы ____
ФИО _____
Проверил:
Преподаватель
ФИО _____

Допуск	Измерения	Защита

Приложение 3. Пример определения физической величины по тангенсу угла наклона графика функции

Вычисления углового коэффициента (тангенса угла наклона) прямой следует проводить в следующей последовательности.

Убедитесь, что линия прямая, так как угловой коэффициент вычисляется только для прямых линий.

Выберите любые две точки, лежащие на прямой.

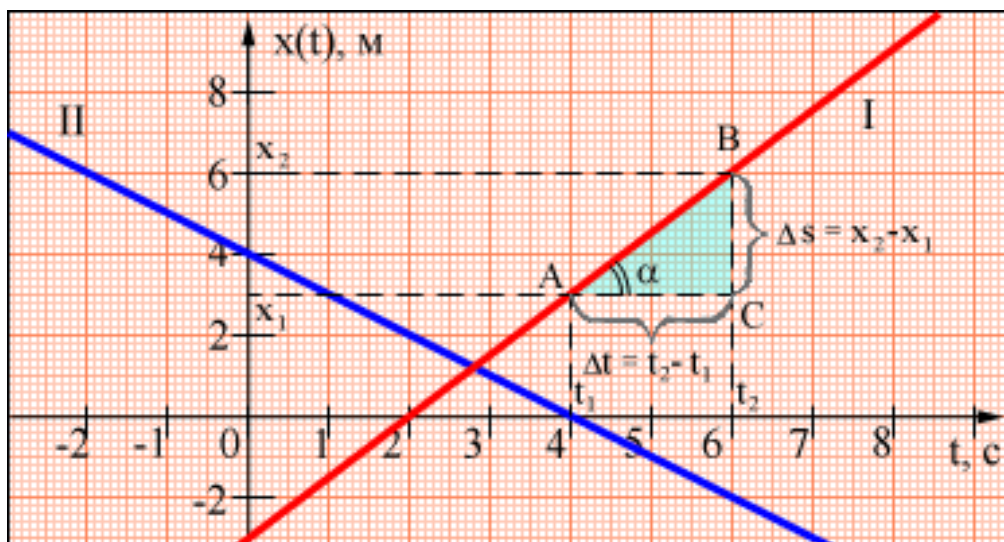
Дайте обозначение выбранным точкам. Не имеет значения, какую из них вы обозначите первой, а какую – второй (главное - на протяжении всего процесса вычисления строго придерживаться выбранного обозначения). Координаты первой точки запишем как x_1 и y_1 , а координаты второй точки как x_2 и y_2 .

Подставьте координаты точек в формулу для вычисления углового коэффициента.

Проверьте: Прямые, идущие вверх слева направо, всегда имеют положительный угловой коэффициент (даже если это дробь). Прямые, идущие вниз слева направо, всегда имеют отрицательный угловой коэффициент (даже если это дробь).

Пример определения величины скорости V по наклону графика зависимости перемещения S от времени t :

$$V = \frac{\Delta(S)}{\Delta(t)} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{6 - 3}{6 - 4} = \frac{3}{2} = 1.5(\text{м/с})$$



Учебное издание

Кузовникова Людмила Александровна

Новиков Павел Вадимович

Ф И З И К А

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

© Кузовникова Л.А.

©Новиков П.В.

.

© Красноярский институт
железнодорожного транспорта филиал ГОУ
ВПО ИрГУПС в г.Красноярске

Редактор Кузовникова Л.А.

Компьютерная верстка Л.А. Кузовниковой

Подписано в печать .

Формат 60 × 84/16

Бумага тип. №

Офсетная печать.

Усл. печ. лист .

Уч.-изд. л.

Заказ №

Тираж 10 экз.

Отпечатано