

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
КАЗАХСКИЙ АГРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. С.СЕЙФУЛЛИНА

**Ж.К. Абельдина**

# **Введение в Виртуальную физику**



Астана, 2012

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина

**УДК: 530.1: 004**  
**ББК 22.3:32.973**  
**A14**

Абельдина Ж.К.,  
**A14 ВВЕДЕНИЕ В ВИРТУАЛЬНУЮ ФИЗИКУ**. Учебное пособие. Астана:  
ТОО «Мастер ПО», 2012. -177 стр.

**ISBN 978-601-7364-99-1**

**Рецензенты:**

**Шаханова Г.А.** – зав. кафедрой Казахстанско-российского университета,  
кандидат физико-математических наук, доцент.

**Кенжебеков Б.Т.** - профессор ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, доктор педагогиче-  
ских наук.

В учебном пособии предлагается курс виртуальной физики, предполагающий использование современных достижений средств телекоммуникационных технологий и средств мультимедиа. В учебном пособии приведены описания лабораторных работ по физике, которые можно выполнять с помощью компьютерной программы. Лабораторные компьютерные тренажеры, создающие виртуальную физическую среду, в которой студент может выполнять лабораторные работы, не используя реального оборудования, но приобретая те же знания и навыки, позволяют решать многие проблемы. Немаловажную роль они играют и при организации дистанционного обучения по дисциплинам, требующим проведения лабораторных занятий. Пособие содержит справочный материал и инструкцию по работе с компьютерными программами.

**УДК: 530.1: 004**  
**ББК 22.3:32.973**

**ISBN 978-601-7364-99-1**

© Абельдина Ж.К., 2012 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие содержит теоретический материал и работы лабораторного практикума по всем разделам физики, которые можно выполнять с помощью компьютерной программы. Всего в него вошло 27 лабораторных работ /1, 2,3/.

Лабораторные компьютерные тренажеры, создающие виртуальную физическую среду, в которой студент может выполнять лабораторные работы, не используя реального оборудования, но приобретая те же знания и навыки, позволяют решать многие проблемы. Немаловажную роль они играют и при организации дистанционного обучения по дисциплинам, требующим проведения лабораторных занятий.

Виртуальный лабораторный практикум естественным образом дополняет классическую схему обучения, состоящую из усвоения теоретического материала и выработки практических навыков экспериментирования в физической лаборатории. Программные продукты, используемые в лабораторном практикуме, представляют собой электронные конструкторы, позволяющие имитировать на экране дисплея реальные физические явления, процессы сборки электрических схем, исследовать особенности их работы, проводить измерения электрических величин так, как это делается в реальном физическом эксперименте.

Одной из главных особенностей комплекса компьютеризованных лабораторных работ является максимально возможная имитация реального физического процесса. Компьютерные тренажеры можно также использовать в рамках его возможностей и для других задач в самостоятельной творческой работе учащихся. Студент в процессе исследования наглядно изучает явление и может манипулировать в ходе эксперимента, например при сборке электрической схемы, видит последствия своих ошибок, учится разбираться в причинах того или иного неудачного эксперимента и вырабатывает необходимые навыки предварительного анализа схемы.

Пособие содержит теоретический материал, курс лекций, прочитанный автором для студентов Казахского агротехнического университета. В конце издания приводятся справочные материалы из разделов физики и краткая инструкция по работе с программой. Это сделано для того, чтобы все самое необходимое было под рукой. Справочный материал дает возможность ознакомиться с информацией из этой области без обращения к разным справочникам, книгам, учебникам и другим пособиям, если в этом нет специальной необходимости.

Для пользования программой достаточно начальных навыков работы в системе Windows. Изложение теории согласуется с программой курса физики для вузов. Все работы составлены по единому плану: указана цель работы, дается теория метода, устанавливается порядок вы-

полнения заданий и последовательность обработки результатов измерения и вычислений. Предварительные сведения о методах проведения работ, о записи и математической обработке результатов, о построении графиков и об оценке погрешностей излагаются во введении.

В работах присутствуют элементы научного исследования, имеется возможность варьировать задания. Внедрение элементов научного исследования в физический практикум курса общей физики должно способствовать активизации познавательной деятельности студентов. Оно является подготовительной основой для постановки НИРС в учебном процессе. В конце описаний приводятся списки контрольных вопросов, позволяющие проконтролировать степень усвоения материала.

Пособие предназначается для студентов стационарных отделений вузов, однако может быть полезен и студентам дистанционных форм обучения.

Отзывы и пожелания автор просит присылать по адресу: 010011, г. Астана, пр. Победы 62<sup>а</sup>, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, кафедра физики и химии.

## 1. ВВЕДЕНИЕ.

Глобализация общественных процессов, стремительные перемены в информационно-коммуникационной инфраструктуре, международная конвергенция и многопрофильная кооперация привели к тому, что общество предъявляет новые требования к путям приобретения и передачи знаний, и той роли, которую играет человек в этих процессах. Одним из актуальных направлений реформирования современной системы образования является системная интеграция информационных и телекоммуникационных технологий в сам образовательный процесс и в управление образованием. В ходе реформирования на первый план выходит задача принципиально нового конструирования содержания и организации учебного материала, педагогической деятельности преподавателя и учебной работы студента в компьютерной среде.

Виртуальные среды обучения – новейшая волна в дистанционном электронном обучении. Они предоставляют простоту, интерактивность и экономичность, которые способны привести к достижению целей образовательного процесса. С их помощью легче переходить от абстракций к виртуальности, виртуальные среды ориентированы на контекст и потребности студентов.

Виртуальная физика это новое уникальное направление в системе образования. Известно, что 90% информации поступает к нам в мозг зрительно. И не удивительно, что пока человек не увидит, он не сможет четко уяснить природу тех или иных физических явлений. Поэтому процесс обучения должен подкрепляться наглядными материалами. Виртуальная действительность позволяет не только увидеть статичную картину, изображающую какое-либо физическое явление, но и посмотреть на это явление в движении. Данный ресурс позволяет педагогам в легкой и непринужденной форме, наглядно показать не только действия основных законов физики, но и поможет провести онлайн лабораторные работы по физике по большинству разделов общеобразовательной программы. Например, показав анимацию сложного физического процесса учащемуся, можно сделать для него это явление понятным. Или можно наглядно показать процесс в динамике и после этого у студентов уже будет меньше вопросов о природе этого явления.

Таким образом процесс обучения из обязательного, к которой все привыкли, превращается в увлекательную процедуру. Студентам интереснее разглядывать анимации физических явлений и это не только упростит, но и ускорит процесс обучения. Помимо всего прочего, при таком способе обучения возможно дать даже больше информации, чем возможно при обычной форме обучения.

Виртуальная среда обучения (BCO) (англ. *virtual learning environment (VLE)*) - программная система, созданная для поддержки процесса дистанционного обучения с упором именно на обучение, в от-

личие от управляемой учебной среды, для которой свойственен акцент на управлении процессом обучения.

ВСО обычно использует сеть Интернет и предоставляет средства для оценки (в частности, автоматической оценки, такие как задачи на выбор), коммуникации, загрузки материалов, возврат работ студентов, оценки коллег, управления группами студентов, сбор и организация оценок студентов, опросы и т.д.. Среди новейших особенностей ВСО - широкое внедрение технологий wiki, блогов и RSS.

Основной составляющей ВСО является Система управления обучением (англ. *Learning management system*). Это понятие близко к понятию Системы управления учебным содержанием (англ. *Learning content management system*).

Идеология ВСО базируется на объектно-ориентированном подходе к обучению, для которого свойственно использование разнообразных учебных объектов.

Существуют определенные ограничения в применении виртуальных сред обучения. Во-первых, в России и Казахстане выбор подобных систем пока весьма ограничен. Во-вторых, зарубежные системы являются дорогостоящими или предполагают дорогостоящую техническую поддержку фирмы-производителя.

Основными компонентами данной системы являются: система представления учебных курсов, журнал успеваемости, модуль статистики, система консультаций, система почтовой рассылки. Система представления учебных курсов позволяет преподавателю удаленно размещать любую информацию о читаемых им курсах, прикреплять файлы к сообщениям, с последующим доступом студентов к этой информации. Имеется возможность ограничить доступ к содержимому курсов двумя уровнями: либо запретить просмотр всего курса целиком, либо запретить скачивание прикрепленных файлов.

Журнал успеваемости отражает текущий процесс изучения курса студентом и его оценки. Модуль статистики собирает статистику посещений системы пользователями по нескольким показателям и представляет ее в текстовом и графическом виде.

Система консультаций позволяет организовать общение преподавателя со студентами.

В настоящее время некоторые модули разработаны, внедрены и активно используются в процессе обучения. Практика показала, что система легка в освоении и использовании как студентами, так и преподавателями.

Электронные ресурсы вуза в виде электронных учебных изданий (ЭУИ) размещены в Электронной библиотеке, доступ к нему предоставлен всем студентам независимо от формы обучения. Но ввиду необходимости защиты интеллектуальной собственности

преподавателей ВУЗа, воспользоваться ресурсами Электронной библиотеки можно только в стенах университета по корпоративной сети.

Электронные ресурсы в формате .pdf размещены в Образовательном портале – раздел Межвузовская библиотека, материалы которой доступны во внешней сети Интернет на сайте Межвузовской электронной библиотеки.

Зайти в Межвузовскую электронную библиотеку можно по ссылке на официальном сайте - Республиканская межвузовская электронная библиотека (РМЭБ) - [www.rmeb.kz](http://www.rmeb.kz). Можно непосредственно обратиться на сайт университета - [www.agun.kz](http://www.agun.kz) На этом сайте студенты могут воспользоваться трудами преподавателей, не только нашего университета, но и преподавателей других казахстанских ВУЗов.

Электронные ресурсы в виде так называемого «контента» доступны студентам в Автоматизированной системе управления обучением “Tamos University Suite” (АСУО “TUS”), вход студентам на нее осуществляется через Образовательный портал при наличии логина и пароля.

Быстро меняющиеся потребности общества, необходимость в быстрой адаптации учебных планов и образовательных программ к потребностям рынка, наблюдающаяся тенденция к уменьшению учебного времени, отводимого на изучение общенаучных дисциплин, таких как физика, требует сегодня увеличения эффективности и гибкости в преподавании этих дисциплин. Достичь желаемого результата можно за счет введения в процесс преподавания инструментов и приемов, базирующихся на информационно-коммуникационных технологиях.

В данном учебном пособии предлагается авторский курс виртуальной физики, предполагающий использование современных достижений средств телекоммуникационных технологий и средств мультимедиа.

## **Измерение физических величин и математическая обработка результатов измерений.**

Физическая величина характеризует определенную особенность физического объекта или явления, отображающую его свойство, состояние или происходящий в нем процесс.

Измерение - экспериментальное определение количественного значения физической величины с помощью специально предназначенных для этого технических средств. Измерить какую-либо физическую величину - значит сравнить ее с другой однородной физической величиной, принятой за единицу измерения.

Измерения подразделяют на прямые и косвенные.

Измерения, при которых значение определяемой величины находится непосредственно из опыта, называются прямыми. Например: измерение длины линейкой, микрометром, штангенциркулем; времени с помощью часов, секундомера и т.д.

Обычно приходится вычислять искомую величину по результатам измерений других величин, связанных с определяемой величиной, функциональной зависимостью. Такие измерения называются косвенными. Например:  $U = S/t$ ;  $a = F/m$  и другие.

Измерение любой физической величины включает в себя три последовательные операции:

1. Установку и наладку приборов.
2. Наблюдение показаний средств измерений и отсчет.
3. Нахождение искомой величины из результатов измерений, оценка погрешности.

### **1. Точность измерений и типы ошибок.**

Измерить физическую величину абсолютно точно невозможно, так как нельзя определить величину точнее, чем дает измерительный прибор. Например, миллиметровой линейкой нельзя измерить длину с точностью до десятых и сотых долей миллиметра.

Не следует добиваться при измерениях большей точности, чем это необходимо для решения поставленной задачи.

В задачу измерений входит не только нахождение самой величины, но и оценка допущенной при измерении погрешности (ошибки). Погрешность результата есть отклонение результата измерения физической величины от ее истинного значения.

По своему происхождению погрешности делятся на три типа: систематические, случайные и промахи. Причины возникновения погрешностей самые разнообразные. Понять возможные причины погрешностей и свести их к минимуму - это и означает грамотно поставить эксперимент.

Систематическими называются погрешности, которые остаются постоянными или изменяются закономерным образом при повторных измерениях. Систематические погрешности вызываются несовершенством измерительных приборов (конструктивными особенностями, их неправильной установкой, неточной градуировкой), недостаточно разработанной теорией опыта и методикой исследования (не учтено влияние среды, роль примесей, применение неточных формул и т. д.), а также какими-либо упущениями исполнителя.

Систематические ошибки обычно дают отклонение результата от истинного значения только в одну сторону (увеличения или уменьшения). Влияние систематических ошибок на результат опыта можно исключить, вводя найденные из наблюдений поправки или улучшая методику измерений.

Случайными называются погрешности, природа и закономерность которых в каждом отдельном измерении нам неизвестны. Их присутствие проявляется в хаотическом изменении результатов повторных измерений одной и той же величины вследствие воздействия случайных факторов. Причинами возникновения случайных погрешностей могут быть: недостаточная чувствительность нашего глаза, плохая освещенность шкалы, непостоянные силы трения в осях измерительных приборов и т. д.

Существование случайных погрешностей делает принципиально невозможным абсолютно точное измерение физической величины. Однако, благодаря тому, что к случайным ошибкам можно применить законы теории вероятности, их влияние на результаты измерений можно учесть или значительно уменьшить.

Промахами называются грубые погрешности, явно искажающие результат измерения. Они вызываются чаще всего неправильными действиями экспериментатора, его небрежностью в проведении опыта, неверным отсчетом по прибору и т. д. Такие измерения следует отбрасывать и производить контрольные замеры.

Измерения могут быть проведены, с точки зрения их точности, либо техническим, либо лабораторным методом.

При использовании технических методов измерение проводится один раз. В этом случае удовлетворяются такой точностью, при которой погрешность не превышает некоторого, наперед заданного значения, определяемого классом точности измерительного прибора.

При лабораторных методах измерения необходимо проводить столько раз, чтобы после статистической обработки результатов наблюдений случайная погрешность не превышала систематическую ошибку.

Теория ошибок, построенная на основе теории вероятностей, позволяет определить наиболее вероятное значение измеряемой величины и указать доверительный интервал, в пределах которого находится искомая величина.

## 2. Методы обработки результатов измерений, содержащих случайные ошибки.

Пусть в одних и тех же условиях одинаково тщательно провели  $n$  измерений физической величины  $X$ . Из полученных значений  $X_i$  ( $i= 1, 2, 3, \dots, n$ ) строится среднее арифметическое

$$\langle X \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

при достаточно большом  $n$  (теоретически бесконечном) совпадающим с истинным значением  $X$ . Каждое измерение дает значение определяемой величины с некоторой погрешностью  $\Delta X$ :

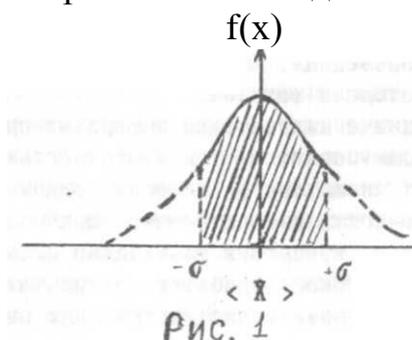
$$\Delta X = \langle X \rangle - X_{\text{изм}}, \quad (2)$$

где  $X_{\text{изм}}$  - значение величины  $X$ , полученное из эксперимента. Величину  $\Delta X$  называют абсолютной погрешностью результата.

Чтобы оценка измеряемой величины  $X$  была полной, недостаточно знать только  $\langle X \rangle$ , надо указать доверительный интервал, в пределах которого находится искомая величина, и доверительную вероятность (надежность) попадания истинного значения искомой величины в пределы этого интервала. Интервал значений от  $(\langle X \rangle - \Delta X)$  до  $(\langle X \rangle + \Delta X)$  называется доверительным интервалом.

В теории погрешностей доказывают, что чаще всего случайный разброс значений измеряемой величины подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

Графически функция распределения Гаусса  $f(x)$  представляет собой симметричную кривую с максимумом в точке  $x = \langle X \rangle$ . Площадь под кривой численно равна вероятности попадания  $P$  измеренной величины



в определенный интервал. Поэтому для всех кривых площади под ними не зависят от качества измерений и равны 1, т.е.

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1. \quad (3)$$

Это условие определяет нормировку достоверного события. Чем точнее применяемый метод наблюдения, тем острее пик кривой.

Аналитически закон распределения Гаусса для  $n \rightarrow \infty$  запишется как

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \langle X \rangle)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где  $f(x)$  - функция плотности вероятности. Она показывает с какой плотностью вероятности располагаются измеренные значения около  $\langle X \rangle$ . Здесь

$$\Delta x = (\langle X \rangle - x)$$

отклонение от истинного значения.

$\sigma^2$  - дисперсия распределения. В случае большого числа измерений ( $n \rightarrow \infty$ ) дисперсия  $\sigma$ , входящая в закон распределения (4), оказывается равной среднеквадратичной ошибке измерения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n}} \quad (5)$$

Величина  $\sigma$  характеризует степень влияния случайных погрешностей на результаты измерения; чем меньше  $\sigma$ , тем точнее проведено измерение.

Если площадь, заключенная под кривой Гаусса между вертикальными линиями  $\pm \sigma$ , равна 68% от всей площади, то среднеквадратичная ошибка называется стандартной ошибкой. За стандартный принимают интервал  $[\pm S_x]$ , где

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}. \quad (6)$$

Результат измерения в данном случае записывают в виде:

$$x = \langle X \rangle \pm t(P, n) \cdot S_x. \quad (7)$$

Здесь  $t(P, n)$  - коэффициенты Стьюдента, зависящие от заданной надежности  $P$  и числа измерений  $n$ . Запись (7) означает, что истинное значение измеряемой величины  $X$  находится в интервале  $[\langle X \rangle - t(P, n) \cdot S_x; \langle X \rangle + t(P, n) \cdot S_x]$  с доверительной вероятностью (надежностью)  $P$ . Величину

$$\Delta X = t(P, n) \cdot S_x \quad (8)$$

называют доверительной случайной погрешностью результата измерения. Аппарат математической статистики позволяет вычислить коэффициенты  $t(P, n)$  для любых  $P$  и  $n$ . Результаты таких вычислений табулированы.

Таблица 1. Коэффициенты Стьюдента

Число измерений n	Надежность P							
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.999
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	3,3

Мерой точности результатов измерений является относительная погрешность

$$\delta_x = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle}, \quad (9)$$

Обратную ей величину

$$\Psi = \frac{1}{\delta_x},$$

называют точностью измерений.

Используя таблицу коэффициентов Стьюдента, иногда решают и обратную задачу: по известной абсолютной погрешности измерительного прибора и заданной величине надежности определяют необходимое число измерений в серии. Опыт показывает, что в студенческой лаборатории число измерений физических величин обычно равно 3-5.

### 3. Оценка точности результатов при техническом измерении и использовании табличных данных

Если систематическая погрешность, определяемая, например, классом точности прибора, заметно превышает случайную, то измерение достаточно проводить один раз.

Пусть в результате измерений получаются одинаковые результаты или случайная погрешность меньше той, которую дает прибор. В подобных случаях за абсолютную погрешность принимается собственная погрешность прибора, т. к. проведение дальнейших измерений в этих условиях бессмысленно. Результат измерений записывают в виде равенства

$$X = X_0 \pm \Delta X,$$

где  $X_0$  - значение измеренной величины, погрешность  $\Delta X = \Delta X_{\text{сист}}$ . Для более точного определения физической величины следует использовать прибор более высокого класса точности, улучшить методику измерения и т. д. В простейших случаях  $\Delta X_{\text{сист}}$  определяется классом точности приборов.

Класс точности измерительных приборов является главной их характеристикой и лежит в основе деления приборов на классы. Всего различают 7 классов точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Показатель класса определяет приведенную (относительную) погрешность измерений в процентах. Определив по шкале прибора класс точности  $\varepsilon$  и предельное значение  $X_{\text{пр}}$ , легко рассчитать его абсолютную погрешность

$$\Delta X = \pm (\varepsilon/100) \cdot X_{\text{пр}},$$

которую принимают одинаковой на всей шкале прибора. Например, миллиамперметр класса точности 1,5 со шкалой 300 мА, дает в любом месте шкалы абсолютную погрешность

$$\Delta X = 0,015 \cdot 300 \text{ мА} = 4,5 \text{ мА}.$$

Относительная погрешность измерения  $\Delta X / \langle X \rangle$  будет тем больше, чем меньше измеряемая величина. Поэтому для оптимального использования приборов их подбирают так, чтобы искомая величина давала отброс на всю шкалу.

Приборы классов 0,1; 0,2; 0,5 применяются для точных лабораторных измерений и называются прецизионными.

Приборы классов 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 применяются в технике и называются техническими.

Приборы с погрешностью более 4% считаются внеклассными. В этом случае абсолютная погрешность принимается равной половине цены наименьшего деления прибора (или цене деления прибора).

Абсолютная ошибка табличных величин равна половине единицы наименьшего разряда данной величины, т. е. если табличная величина взята с точностью до десятых, то абсолютная погрешность этой величины равна 0,05 и т. д. Например, для нормального ускорения свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  абсолютная ошибка  $\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$ .

#### 4. Порядок обработки результатов прямых измерений.

Пусть измерение состоит из  $n$  независимых повторных наблюдений величины  $X_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

1. Результаты каждого измерения заносятся в таблицу.
2. Вычисляется среднее значение  $\langle X \rangle$  из  $n$  измерений:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) \quad (10)$$

3. Находятся абсолютные отклонения (погрешности) отдельных измерений:

$$\begin{aligned}
\Delta X_1 &= \langle X \rangle - X_1; \\
\Delta X_2 &= \langle X \rangle - X_2; \\
\Delta X_3 &= \langle X \rangle - X_3; \\
&\dots\dots\dots \\
&\dots\dots\dots \\
\Delta X_n &= \langle X \rangle - X_n;
\end{aligned}
\tag{11}$$

В простейших случаях за абсолютную погрешность  $\Delta X$  принимают среднюю абсолютную погрешность результата. Для определения средней абсолютной погрешности (среднего абсолютного отклонения) результата берут среднее арифметическое абсолютных значений (модулей) отдельных погрешностей, т.е.

$$\langle \Delta X \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta X_i|
\tag{12}$$

4. Для более точной оценки измерения вычисляется среднеквадратичное отклонение результатов отдельных наблюдений (среднеквадратичная ошибка измерения (5)):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n}}$$

5. Определяется среднеквадратичная погрешность среднего арифметического по формуле (6):

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}$$

6. Задается значение надежности  $P$  (по указанию преподавателя). По таблице определяется коэффициент Стьюдента  $t(P, n)$  для заданной надежности и числа произведенных измерений  $n$ . Находится доверительный интервал (абсолютная погрешность результата измерений (8)).

$$\Delta X = t(P, n) \cdot S_x.$$

7. Если величина случайной погрешности результата измерений (8) окажется сравнимой с величиной погрешности прибора  $\Delta X_{\text{сист}}$ , то в качестве границы доверительного интервала следует взять величину

$$\Delta X = \sqrt{(t(P, n) \cdot S_x)^2 + (\Delta X_{\text{сист}})^2}.
\tag{13}$$

8. Оценивается относительная погрешность (9) результата измерений (в процентах):

$$\delta_x = \frac{\langle \Delta X \rangle}{\langle X \rangle} \cdot 100\%.
\tag{14}$$

9. Окончательный результат записывается в виде

$$X = \langle X \rangle \pm \Delta X \quad (15)$$

### 5. Порядок обработки результатов косвенных измерений.

В тех случаях, когда физическая величина не может быть измерена непосредственно, прибегают к косвенным измерениям. Пусть  $X$  связана с величинами  $y$  и  $z$  некоторой функциональной зависимостью

$$X = f(y, z). \quad (16)$$

Тогда наилучшее значение при оценке  $X$  равно

$$\langle X \rangle = f(\langle y \rangle, \langle z \rangle). \quad (17)$$

где  $\langle y \rangle$  и  $\langle z \rangle$  находятся по формуле (10). Так как величины  $y$  и  $z$  определяются путем прямых измерений, то их погрешности  $\Delta y$  и  $\Delta z$  можно оценить по формулам (12) или (8), в зависимости от желаемой точности определения результата. Часто достаточно простой оценки для определения  $\Delta X$  как разности  $(X - \langle X \rangle)$ , тогда

$$\Delta X = f(\langle y \rangle + \Delta y, \langle z \rangle + \Delta z) - f(\langle y \rangle, \langle z \rangle) \approx \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z, \quad (18)$$

т. е. погрешность косвенного измерения находится через ошибки прямых измерений по правилу дифференцирования. Более точным является следующее выражение:

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta z^2} \quad (19)$$

где  $\partial f/\partial y$  и  $\partial f/\partial z$  - частные производные по  $y$  и  $z$ , взятые при значениях  $y = \langle y \rangle$ ,  $z = \langle z \rangle$ .

Часто удобно выражать точность, с которой найдена величина  $X$  через относительную погрешность (9).

$$\delta_x = \frac{\langle \Delta X \rangle}{\langle X \rangle},$$

где  $\langle X \rangle$  - рассчитывается по формуле (10). Исходя из данного определения, результат измерений можно записать в виде

$$X = \langle X \rangle \pm \Delta X = \langle X \rangle \left(1 \pm \frac{\langle \Delta X \rangle}{\langle X \rangle}\right) = \langle X \rangle (1 \pm \delta_x). \quad (20)$$

В общем случае относительную погрешность измерения следует вычислять в такой последовательности:

1. Прологарифмировать расчетную формулу;  $1 \text{ п } X = 1 \text{ п } f$ .
2. Найти полный дифференциал от логарифма:  $d(1 \text{ п } X) = dX/X$ .
3. Сгруппировать все члены, содержащие одинаковый дифференциал, выражения в скобках, стоящие перед дифференциалом, взять по модулю;

заменить значок дифференциала  $d$  на  $\Delta$ ; знаки выбирают так, чтобы абсолютная величина относительной ошибки была максимальной.

## 6. Правила вычисления погрешностей

Абсолютная погрешность  $\Delta X$  измеряется в единицах искомой величины. Истинное значение измеряемой величины лежит в пределах от  $(\langle X \rangle - \Delta X)$  до  $(\langle X \rangle + \Delta X)$ . Поэтому конечный результат принято записывать в виде:

$$X = |\langle X \rangle \pm \langle \Delta X \rangle|.$$

В итоге измерений и вычислений получают результат, в котором различают цифры верные и сомнительные, содержащие ошибки. Абсолютная погрешность указывает, в каком знаке этого числа содержится неточность, т. е., какие цифры являются сомнительными в числовом значении измеренной величины. Поэтому абсолютную ошибку обычно выражают одной значащей цифрой и лишь при особо ответственных измерениях - двумя. Так как точность определения физической величины обусловлена измерением, а не вычислением, то округление числового значения результата измерения производится до цифры того же порядка, что и значение погрешности.

При округлении результатов измерений необходимо руководствоваться следующими правилами приближенных вычислений:

1. Лишние цифры у целых чисел заменяются нулями, а у десятичных дробей отбрасываются. Например,

$$X = 19\,475 \pm 236 \text{ (до округления);}$$

$$X = 19\,500 \pm 200 \text{ (после округления).}$$

2. Если заменяемая нулем или отбрасываемая цифра старшего разряда меньше 5, то остающиеся цифры не изменяются, а если указанная цифра больше 5, то последняя остающаяся цифра увеличивается на 1. Например,

$$X = 194,76 \pm 0,32 \text{ (до округления);}$$

$$X = 194,8 \pm 0,3 \text{ (после округления).}$$

3. Если заменяемая нулем или отбрасываемая цифра равна 5 (с последующими нулями), то последняя цифра в округленном числе не изменяется, если она четная, и увеличивается на 1, если она нечетная. Например,

$$X = 194,55 \pm 0,31 \text{ (до округления);}$$

$$X = 194,6 \pm 0,3 \text{ (после округления).}$$

При представлении окончательных результатов физических измерений часто применяют запись числовых значений в виде произведения десятичной дроби на соответствующую степень числа 10. Например,

$$5273 = 5,273 \cdot 10^3; \quad 0,0364 = 3,64 \cdot 10^{-2}.$$

Если в расчетные формулы входят константы, например число  $e$ , физические постоянные, табличные данные, то они берутся так, чтобы чис-

ло значащих цифр в них было на единицу больше, чем число значащих цифр в значениях измеряемых величин. Тогда константы практически не вносят погрешности в окончательный результат.

## 7. Правила построения графика.

Графическое изображение зависимостей между различными величинами играет важную роль при изучении физических закономерностей, т. к. позволяет наглядно проследить зависимость одной величины от другой.

Для графического изображения зависимостей чаще всего используется прямоугольная система координат. Для того, чтобы построить график, необходимо на основании проделанных измерений составить таблицу, в котором каждому значению одной из величин соответствует определенное значение другой величины. При построении графика значения независимой переменной  $X$  следует откладывать по горизонтальной оси, а значения функции  $Y$  - по вертикальной оси. Около каждой оси нужно написать обозначение изображаемой физической величины и указать, в каких единицах она измеряется. Например, если изучается зависимость абсолютного удлинения проволоки  $\Delta l$  (мм) от приложенной нагрузки  $F$  (Н), т. е.  $\Delta l = f(F)$ , то на графике по оси абсцисс откладывается значение величины  $F$  в Н, а по оси ординат  $\Delta l$  в мм (рис. 2). Затем следует правильно выбрать масштаб. Масштаб по каждой оси может быть свой, причем выбрать его следует так, чтобы пределы измерений обеих величин ограничивали на осях отрезки примерно одинаковые по величине, иначе график может оказаться очень сжатым по одной из осей и неудобным для пользования. Когда масштаб выбран, нужно разделить оси в выбранном масштабе на равные интервалы и надписать на осях значения этих интервалов.

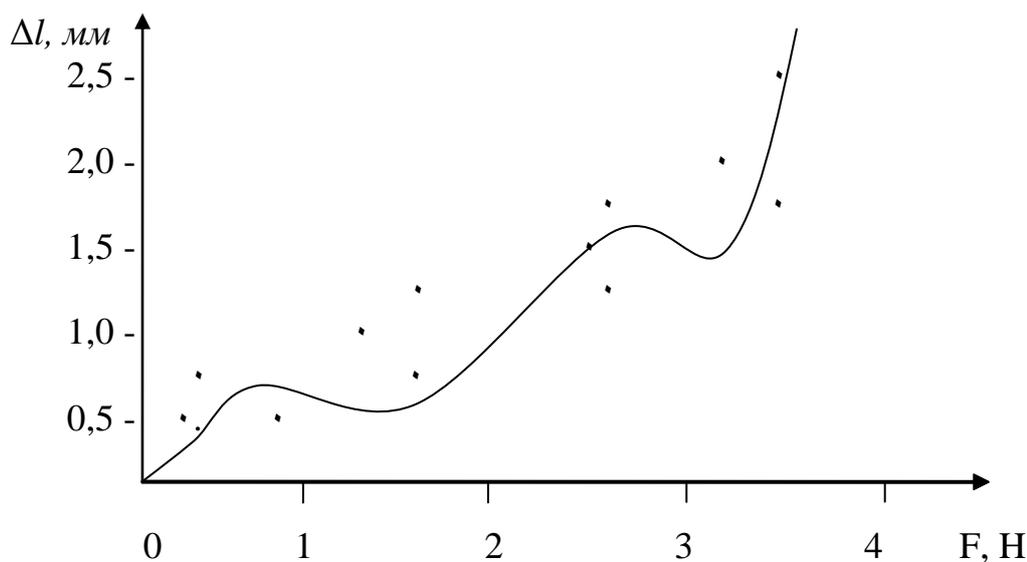


Рис. 2

Так, если сила  $P$  меняется от 0 до 4 Н, а  $\Delta l$  от 0 до 2,5 мм, то масштаб наносится как на рисунке 2.

После этого на график наносят точки на основании данных таблицы измерений и соединяют плавной линией. Т. к. все измерения сделаны с той или иной ошибкой, то имеет место некоторый разброс точек (они не укладываются точно на кривую). В этом случае линию нужно проводить между точками так, чтобы возможно большее число точек легло на эту линию, а остальные распределялись примерно равномерно выше и ниже ее (рис.2). Нанесенные точки должны быть ясно видны на графике и после проведения плавной прямой.

Если первое значение измеряемой величины значительно отличается от нуля, и особенно, если изменение этой величины невелико, отсчет в начале координат нужно начинать не с нуля, а от некоторого значения, близкого к первому измеренному значению данной величины.

## **2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

## Рекомендации для выполняющих работы.

1. Прежде, чем приступить к выполнению какой-либо работы, изучите в учебнике соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать.
2. До выполнения работы следует начать подготовку отчёта по работе и начертить таблицы для результатов измерений.
3. Выполняйте опыты в соответствии с описанием, которое можно также прочитать, нажав кнопку «ход работы».
4. Результаты заносите в таблицу, которую вы уже подготовили заранее.
5. После снятия результатов необходимо выполнить все расчёты, о которых говорится в ходе работы, и построить все графики. При выполнении работы необходим калькулятор.
6. При необходимости следует оценить погрешность измерений.
7. Отчёт должен выглядеть так:

*Номер и название работы, исполнитель.*

*Цель работы.*

*Очень кратко о сути работы, рабочие формулы, применяемые в данной работе.*

*Таблица результатов измерений, начерченная заранее, заполненная в процессе работы.*

*Результаты расчётов (по возможности, сами результаты также помещаются в таблице).*

*Графики, если они нужны в данной работе.*

*Окончательный результат, а если необходимо, то и его погрешность.*

*Выводы, которые можно сделать из этой работы.*

Отчёт следует выполнить на бумаге, а можно завести для этого файл в компьютере.

**ТЕМА: МЕХАНИКА.**  
**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

**Изучение движения тел при наличии  
сил вязкого трения**

**Цель работы:** Изучение движения тел в вязких средах и определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса.

**О работе:**

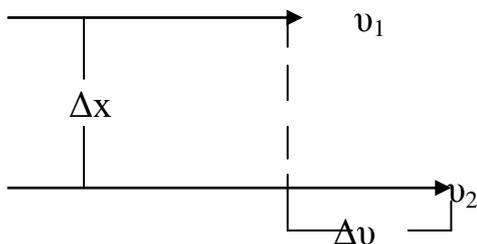
При движении тел в жидкостях или газах на тела действуют силы вязкого трения, вызванные перемещением слоев данной жидкости или газа относительно друг друга. Эти силы направлены в сторону, противоположную движению и при малых скоростях они пропорциональны первой степени скорости.

Если тело при этом движется в однородном поле, например, в поле тяжести или в поле заряженного плоского конденсатора то сначала его движение является ускоренным, а затем постепенно движение устанавливается и его скорость становится постоянной. Теорию такого движения разработал английский физик и математик Дж. Стоке в 1851 году.

В данной работе изучается движение тел в вязких средах под действием силы тяжести.

При движении жидкости или газа возникают силы внутреннего трения. Эти силы возникают вследствие того, что движение жидкости или газа слоистое и скорости перемещения слоев разные. Силы внутреннего трения направлены к уравниванию скорости движения всех слоев. Уравнивание скорости слоев осуществляется путем передачи импульса молекулами более быстрого слоя молекулам слоя, движущегося медленно. Это приводит к увеличению скорости движения более медленного слоя. Слой же, движущийся быстрее, начинает двигаться медленнее, так как молекулы из медленного слоя, попадая в более быстрый слой, получают в быстром слое импульс, что приводит к его торможению. Таким образом, внутреннее трение обусловлено переносом импульса  $m \mathbf{v}$  молекулами вещества, которые переходят из слоя в слой и создают силы трения между слоями газа или жидкости перемещающимися с различными скоростями. Опыт показал, что сила внутреннего трения  $F$  пропорциональна градиенту скорости  $\frac{\Delta v}{\Delta x}$  и площади соприкасающихся слоев  $\Delta S$ . Коэффициент пропорциональности  $\eta$  называется коэффициентом вязкости.

$$F = - \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta S \quad (1)$$



Знак «-» в формуле показывает, что сила  $F$  направлена противоположно вектору скорости. Градиентом скорости называется изменение скорости на единицу длины  $\Delta x$  в направлении, перпендикулярном скорости движения слоев.

Коэффициент динамической вязкости или внутреннего трения, есть физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, между слоями с площадью, равной единице, при градиенте скорости, равном единице

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta S} \quad (2)$$

Размерность коэффициента вязкости в СИ  $[\eta] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]$

Наряду с коэффициентом динамической вязкости часто употребляют коэффициент кинематической вязкости

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad \text{где } \rho - \text{плотность жидкости.}$$

Коэффициент вязкости может быть определен методом падающего груза в вязкой среде (метод Стокса). Рассмотрим свободное падение шарика в вязкой покоящейся жидкости (рис.) На шарик действуют

1. Сила тяжести 
$$P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (3)$$

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

2. Выталкивающая сила (по закону Архимеда)

$$F_A = m_1 g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{жс} g \quad (4)$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости.

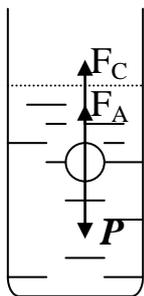
3. Сила сопротивления движению, вычисленная Стоксом, обусловленная силами внутреннего трения между слоями жидкости

$$F_C = 6 \pi \eta r v \quad (5)$$

где  $v$  - скорость слоев жидкости.

Здесь играет роль не трение шарика о жидкость, а трение отдельных слоев жидкости друг о друга, т.к. при прикосновении твердого тела с жидкостью к поверхности тела тотчас же прилипают молекулы жидкости. Тело обволакивается слоями жидкости и связано с ними межмолекулярными силами. Непосредственно прилегающий к телу слой жидкости движется вместе с телом со скоростью движения тела. Этот слой увлекает в своем движении соседние слои жидкости, которые на некото-

рый период времени приходят в плавное безвихревое движение (если малые скорости и маленькие шарики). Равнодействующая сил, действующих на шарик



$$R = P - (F_A + F_C) \quad (6)$$

Вначале скорость движения шарика будет возрастать, но так как по мере увеличения скорости шарика сила сопротивления будет также возрастать, но наступит такой момент, когда сила тяжести  $P$  будет уравновешена суммой сил  $F_A$  и  $F_C$ , т.е.

$$R = 0; \quad P = F_A + F_C \quad (7)$$

С этого момента движение шарика становится равномерным с какой-то скоростью  $v_0$ . Подставляя в формулу (7) соответствующие значения  $P$ ,  $F_A$  и  $F_C$  получим для коэффициента вязкости выражение

$$\eta = \frac{2}{9} (\rho - \rho_{ж}) \frac{gr^2}{v_0} \quad (8)$$

Экспериментальная установка состоит из стеклянного цилиндра наполненного жидкостью. На цилиндр нанесены две горизонтальные метки, расположенные друг от друга на расстоянии  $l$ . Диаметры шариков измеряют микрометром.

### Ход работы:

В данной работе на экране компьютера моделируется падение тела в среде с сопротивлением - в жидкости или газе. В ходе эксперимента нужно определить вязкости исследуемых веществ.

### Рекомендуется следующий ход работы:

**1. Выбрать вещество.** Для выбора вещества на окне с его названием нужно нажать левую кнопку мыши. Появится список возможных вариантов. Из этого списка нужно выбрать среду, например растительное масло, при этом его плотность и вязкость отобразятся в окне "Начальные условия". Дело в том, что вязкость этого вещества такова, что для него сравнительно легко проследить за установлением скорости. Выбрав рабочее вещество, нажмите кнопку "Условия заданы".

**2. Для выбранного вещества найти зависимость пройденного пути от времени.** Следует нижнюю метку поставить в положение 1 см., затем нажать кнопку "Новое измерение". Записать время, за которое шарик прошел это расстояние, переместить данную метку вниз (шаг 1 см) и повторить опыт, и т.д. Прodelать опыт для двух диаметров шарика (лучше взять 1 мм и 2 мм). Диаметр устанавливается путем введения числа в соответствующее окно.

**3. Построить графики зависимости пути от времени.** А масштаб на осях выбрать таким, чтобы график занимал всю площадь листа.

**4. Определить вязкость вещества.** Воспользоваться графиком, соответствующим большему шарика. На этом графике изобразить линию установившегося движения (наклонную асимптоту) и по наклону этой прямой определить вязкость жидкости. Полученный результат сравнить с табличным значением.

**5. Прodelать опыт для другого вещества.** Для выбора нового вещества нажмите кнопку "Изменить условия". Выбрав рабочее вещество, нажмите кнопку "Условия заданы". Выполните с данным веществом операции, описанные в пунктах 2, 3, и 4. Обратите внимание на график зависимости пройденного пути от времени для этого вещества. *Если на графике не будет участка прямой, соответствующего установившемуся движению, то вязкость данной жидкости таким методом определить нельзя.*

**6. Определить вязкость вещества, наблюдая установившееся движение.** Пояснения к выбранному пункту: Для наиболее вязкого вещества определите вязкость, наблюдая установившееся движение. Для этого поставьте верхнюю метку на некотором расстоянии (около 3 см.) от уровня жидкости, чтобы на этом участке успело установиться равномерное движение. Бросьте в жидкость шарик, измерьте скорость его равномерного движения до нижней метки, находящейся на уровне 15 см, и вычислите вязкость. Прodelайте этот опыт с тремя шариками разных диаметров (например, 0.5, 1 и 2 мм).

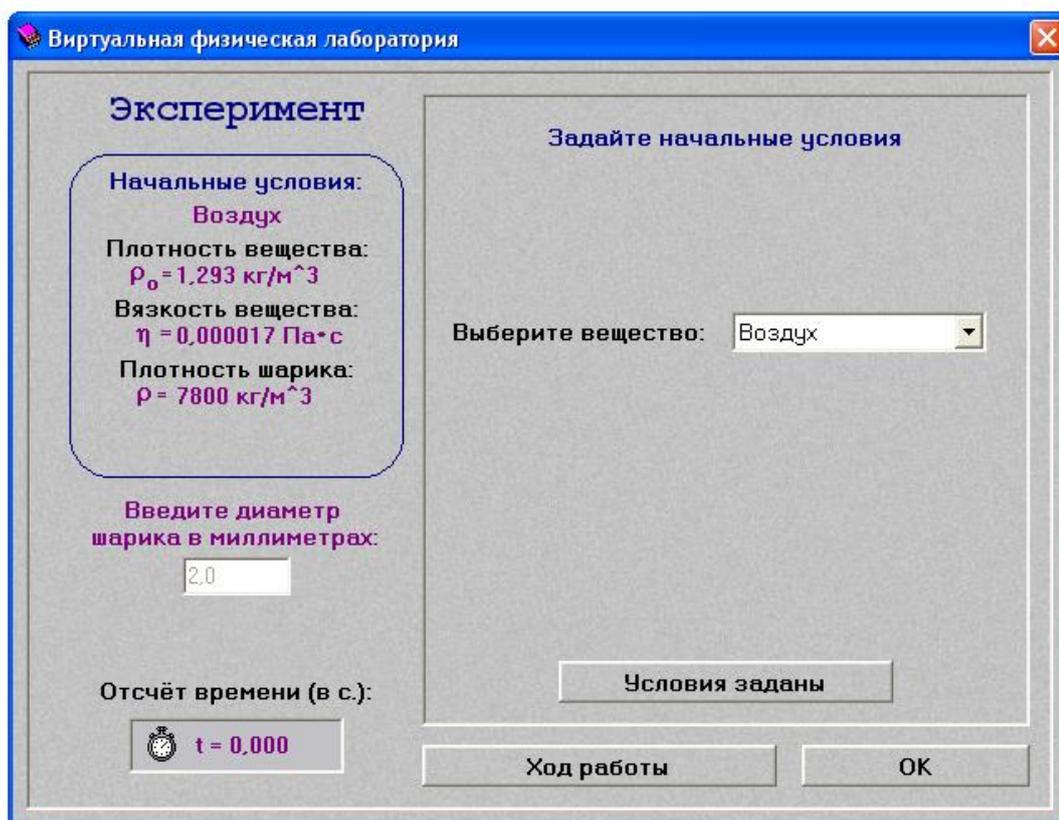


Таблица 1.1.

Начальные условия		вещество:			$\rho_0, (кг/м^3)$				$\rho_m, (кг/м^3)$				$\eta, (кг/м \cdot с)$			
<i>d</i> , <i>мм</i>	<i>S</i> , (м)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	<i>t</i> , (с)															
	<i>v</i> , (м/с)															
	<i>v<sub>ср</sub></i> , (м/с)															
Начальные условия		вещество:			$\rho_0, (кг/м^3)$				$\rho_m, (кг/м^3)$				$\eta, (кг/м \cdot с)$			
<i>d</i> , <i>мм</i>	<i>S</i> , (м)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	<i>t</i> , (с)															
	<i>v</i> , (м/с)															
	<i>v<sub>ср</sub></i> , (м/с)															

### Контрольные вопросы:

1. Что такое путь, перемещение?
2. Дать определение и записать формулу средней скорости, мгновенной скорости.
3. Что характеризует нормальное, тангенциальное и полное ускорение и чему они равны?
4. Что такое давление в жидкости? Давление – величина векторная или скалярная? Какова единица давления в СИ?
5. Сформулируйте и поясните законы Паскаля.
6. Сформулируйте и поясните законы Архимеда.
7. Что такое градиент скорости?
8. Как возникают силы внутреннего трения?
9. Записать формулу явления переноса импульса (внутреннего трения).
10. Каков физический смысл коэффициента динамической вязкости?
11. Определить физический смысл коэффициента вязкости. Единица измерения коэффициента вязкости в системе СИ?
12. Как зависит коэффициент вязкости от температуры?
13. Какое течение жидкости называется ламинарным?
14. Какое течение жидкости называется турбулентным?
15. Что характеризует число Рейнольдса?
16. Поясните (с выводом) практическое применение методов Стокса и Пуазейля?
17. Вывести расчетную формулу коэффициента вязкости.

*ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2*  
**Определение момента инерции однородного диска  
методом колебаний**

**Цель работы:** Знакомство с понятием момента инерции, с уравнениями вращательного и колебательного движения, а также определение момента инерции колеса методом колебаний.

**О работе**

Малые колебания маятников - математических и физических - занимают заметное место среди механических колебаний. Они применяются в различных механизмах вроде часов. В физике их используют, например, для определения ускорения свободного падения. В данной работе малые колебания физического маятника применяются для измерения момента инерции тела.

Физическим маятником называется твердое тело, способное совершать колебания под действием силы тяжести вокруг неподвижной оси, не проходящей вокруг центра тяжести (рис.1).

Вращение твердого тела характеризуется моментом силы, моментом инерции и угловым ускорением, которые связаны между собой

$$M = J \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Момент инерции твердого тела есть мера его инертности при вращательном движении, и измеряется суммой произведений масс точек тела на квадраты их расстояний до оси вращения

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (2)$$

Для тел правильной геометрической формы момент инерции вычисляется интегрированием. Для тел неправильной геометрической формы – экспериментально.

Если физический маятник отклонить на угол  $\varphi$ , то на него будут действовать сила тяжести  $P$  в центре тяжести  $C$  и сила реакции опоры  $N$  в точке  $O$ . Ввиду того, что векторы этих сил не направлены по одной прямой, действие их не скомпенсировано. Если спроектировать силу тяжести на оси  $x$  и  $y$ , то проекция  $P_x$  является возвращающей силой, момент которой равен

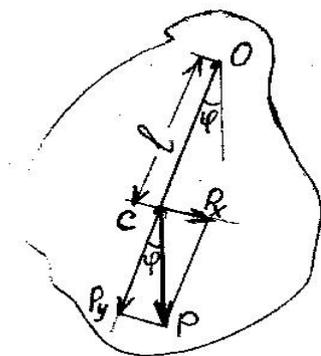


Рис. 1

$M = -P_x l$ ; где  $P_x = P \cdot \sin \varphi$   $M = -mgl \sin \varphi$   
 где  $\varphi$  - угол отклонения, не превышающий  $3-5^\circ$ .  
 Так как угол отклонения мал, то значение  $\sin \varphi$   
 можно заменить значением угла, т.е.  $\sin \varphi \approx \varphi$ . Те-  
 перь момент силы будет равен:

$$M = -mgl \cdot \varphi \quad (3)$$

Момент силы сообщает маятнику угловое ускоре-  
 ние, которое определяется как вторая производная  
 от угла поворота

$$\varepsilon = \ddot{\varphi} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

Приравнивая значение моментов сил (уравнения (1) и (3)) получим  
 дифференциальное уравнение второго порядка:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mgl \cdot \varphi \Rightarrow \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{mgl}{J} \cdot \varphi$$

Произведение  $\frac{mgl}{J}$  равно квадрату угловой скорости  $\omega^2$ . Тогда:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega^2 \varphi = 0$$

Угловая скорость связана с периодом обращение  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . Отсюда сле-

дует

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$$

и момент инерции будет равен  $J = \frac{(m + M)g l T^2}{4\pi^2}$

относительно оси, проходящей через точку O.

По теореме Штейнера определяем момент инерции относительно  
 центра тяжести C: момент инерции тела J относительно произвольной  
 оси равен моменту его инерции  $J_c$  относительно параллельной оси, про-  
 ходящей через центр масс C тела, сложенному с произведением массы m  
 тела на квадрат расстояния d между осями:

$$J = J_c + md^2,$$

$$J_c = J - md^2,$$

где  $d = l$ .

### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделиру-  
 ются колебания однородного диска. По результатам эксперимента нуж-  
 но вычислить его момент инерции.

**Рекомендуется следующий ход работы**

**1. Измерить диаметр диска и шарика при помощи линейки.** Линейка может перемещаться при помощи мыши - при нажатой левой кнопке.

**2. Запустить колебания.** Колебания осуществляются после нажатия на кнопку "Пуск" управления колебаниями. Кнопка "Сброс" возвращает маятник в первоначальное положение.

**3. Измерить время 20 полных колебаний.** При помощи кнопки "Пуск" включить секундомер и измерить время 20 полных колебаний. Для выключения секундомера нажать "Стоп". Опыт повторить 10 раз.

**4. Вычислить среднее время и средний период 20 колебаний.** Средний период колебаний равен отношению времени колебаний к числу колебаний.

**5. По полученным результатам вычислить момент инерции диска.** Не забудьте при этом перевести все необходимые для вычислений физические величины в одну систему единиц, например в систему СИ. Масса диска равна 200 граммам.

**6. Рассчитать погрешность окончательного результата.** Для расчета погрешности окончательного результата воспользуйтесь соответствующими формулами, приведенными в приложении к лабораторной работе.

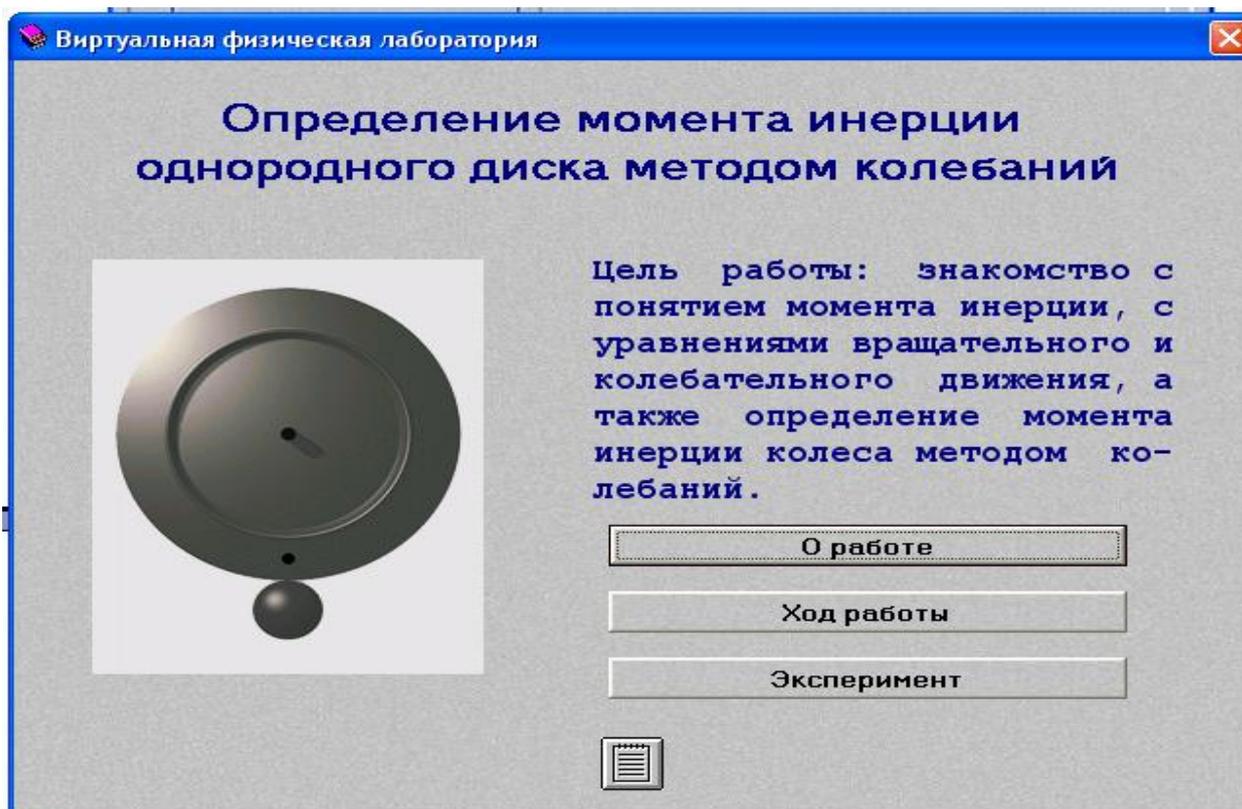


Таблица 2.1.

Начальные условия	$D(\text{мм})$	$d(\text{мм})$	$l,(\text{м})$	$\Delta l,(\text{м})$	$M(\text{кг})$	$m(\text{кг})$	$N$
$t(\text{с})$							$t_{\text{ср}}$
$T(\text{с})$							$T_{\text{ср}}$
$I(\text{кг}\cdot\text{м}^2)$							
$\Delta I(\text{кг}\cdot\text{м}^2)$							

Определить относительную ошибку в процентах:

$$\frac{\Delta I_{\text{ср}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T}$$

Контрольные вопросы:

1. Какой маятник называется физическим?
2. Выведите формулу для периода колебаний физического маятника.
3. Что такое приведенная длина физического маятника?
4. Что характеризует момент инерции, в каких единицах измеряется?
5. Какова роль момента инерции во вращательном движении?
6. Сформулируйте и поясните теорему Штейнера.
7. Какова формула для кинетической энергии тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, и как ее вывести?
8. Что называется моментом силы относительно неподвижной точки? Относительно неподвижной оси? Как определяется направление момента силы?
9. Выведите и сформулируйте уравнение динамики вращательного движения твердого тела.
10. Что такое момент импульса материальной точки? твердого тела? Как определяется направление вектора момента импульса?
11. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса? В каких системах он выполняется? Приведите примеры.
12. Каким свойством симметрии пространства обуславливается справедливость закона сохранения момента импульса?
13. Сопоставьте основные уравнения динамики поступательного и вращательного движений, прокомментировав их аналогию.
14. Получить расчетную формулу момента инерции физического маятника.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Изучение резонанса пружинного маятника

**Цель работы:** Изучение затухающих и вынужденных колебаний, а также построение амплитудной и фазовой характеристик для вынужденных колебаний пружинного маятника.

#### О работе

Свободные колебания затухают вследствие действия сил трения, поэтому для получения незатухающих колебаний необходима внешняя, так называемая вынуждающая сила. В простейшем случае эта сила изменяется со временем по гармоническому закону.

Амплитуда установившихся колебаний зависит от силы трения, а также от соотношения частоты изменения внешней силы и частоты свободных колебаний данной системы. Если эти частоты близки, то скорость колеблющегося тела изменяется в фазе (в такт) с колебаниями внешней вынуждающей силы, при этом амплитуда колебаний резко возрастает. Это явление называется резонансом. Резонанс играет огромную роль в технике и в разных разделах физики.

В данной работе моделируются вынужденные колебания пружинного маятника и исследуются резонансные явления.

Колебания – движения или процессы, характеризующиеся определенной повторяемостью во времени.

Колебания, происходящие за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему, называются свободными или собственными.

Колебания считаются периодическими, если система приходит в положение равновесия через равные промежутки времени. Простейшими периодическими колебаниями являются гармонические, в которых смещение тела или системы от положения равновесия совершается по закону синуса или косинуса.

Груз массой  $m$ , подвешенный на упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы  $F_{упр} = -kx$  представляет собой пружинный маятник.

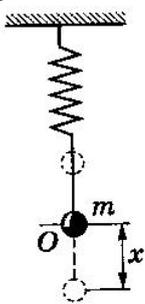


Рис. 1

При рассмотрении колебаний пружинного маятника необходимо: пренебречь сопротивлением среды; учесть, что на маятник, находящийся в положении равновесия, действуют две силы: сила тяжести и сила упругости пружины, равные друг другу, но направленные противоположно; при перемещениях маятника вниз от положения равновесия возникает дополнительная сила упругости, направленная к положению равновесия

То же самое будет при отклонении маятника вверх, но природа силы будет иная. Это – равнодействующая силы тяжести и (не полностью ком-

пенсирующей ее) силы упругости пружины. По величине эта равнодействующая пропорциональна величине смещения  $x$  от положения равновесия маятника. Таким образом, возвращающая сила, действующая на отклоненный маятник - это сила квазиупругая, равная по закону Гука

$$F_{упр} = -kx, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент упругости или жесткость пружины.

Тогда по II закону Ньютона  $-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$ , (2)

где  $m$  – масса маятника,  $a = \frac{d^2x}{dt^2}$  – ускорение, равное второй производной смещения по времени.

Преобразовав это уравнение к виду  $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$  (3)

и представив  $\frac{k}{m} = \omega_0^2$ , получим динамическое уравнение свободных

незатухающих гармонических колебаний  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2x = 0$  (4)

Решением этого дифференциального уравнения является функция

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5)$$

Формула (5) выражает смещение  $x$  пружинного маятника в любой момент времени  $t$  и является кинематическим уравнением гармонического колебания в общем виде.

$A$  – амплитуда - максимальное отклонение от положения равновесия  $(\omega_0 t + \varphi_0)$  – фаза - величина, определяющая положение колеблющейся системы в любой момент времени  $t$

$\varphi_0$  – начальная фаза колебания, определяющая положение системы в начальный момент времени  $t = 0$

$\omega_0$  – круговая (циклическая) частота - количество полных колебаний за  $2\pi$  секунды

Время одного полного колебания - период  $T$

Число полных колебаний, совершаемых в единицу времени – частота

колебания  $\nu$ . Они связаны  $T = \frac{1}{\nu}$   $\omega_0 = 2\pi \nu$

Учитывая, что  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ , получим период колебаний пружинного ма-

ятника  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$  (6)

Выясним физический смысл коэффициента упругости  $k$ :

$$k = -\frac{F_y}{x} = \frac{F_q}{x}; \quad (7)$$

где  $F_q$  - внешняя деформирующая сила, в соответствии с III- законом Ньютона  $F_q = -F_{упр}$ . Следовательно, коэффициент упругости  $k$  численно равен внешней силе, вызывающей деформацию пружины, равную единице длины.

Свободные колебания, амплитуда которых из-за потерь энергии реальной колебательной системой с течением времени уменьшается, называются затухающими. Такие колебания совершаются при одновременном действии силы упругости  $F_{упр} = -kx$  и силы сопротивления

$$F_c = -r \cdot v$$

где  $r$  - коэффициент сопротивления среды,  $v$  - скорость колеблющейся системы. Динамическое дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (8)$$

решением которого является кинематическое уравнение:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (9)$$

$A_0$  - начальная амплитуда при  $t = 0$

$e$  - основание натурального логарифма

$\beta = \frac{r}{2m}$  - коэффициент затухания,  $\varphi_0$  - начальная фаза

$\omega$  - циклическая частота свободных затухающих колебаний.

Величины циклических частот затухающих и незатухающих колебаний связаны соотношением  $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$ . Амплитуда при затухающих свободных колебаниях уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону:

$$A_t = A_0 e^{-\beta t} \quad (10)$$

Скорость затухания колебательного движения характеризуется декрементом затухания, который равен отношению двух последующих амплитуд, разделенных интервалом времени, равным одному периоду колебания (рис. 2)

Затухание нарушает периодичность колебаний, поэтому затухающие колебания не являются периодическими и, строго говоря, к ним неприменимо понятие периода или частоты. Однако если затухание мало, то можно условно пользоваться понятием периода как промежутка времени между двумя последующими максимумами (или минимумами) колеблющейся физической величины (рис. 2). Тогда период затухающих колебаний равен

$$T = 2\pi / \omega = 2\pi / \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

Если  $A(t)$  и  $A(t + T)$  — амплитуды двух последовательных колебаний, соответствующих моментам времени, отличающимся на период, то отношение

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta T}$$

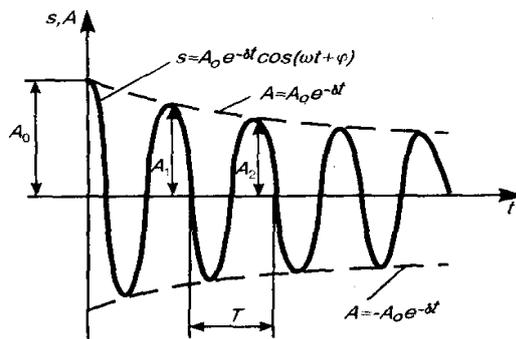


Рис. 2

$$\delta = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta T} \quad (11)$$

Натуральный логарифм этого отношения называется логарифмическим декрементом затухания:

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e} \quad (12)$$

здесь  $\tau = 1/\beta$  - промежуток времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в  $e$  раз, называется **временем релаксации**.

$N_e$  - число колебаний, совершаемых за время уменьшения амплитуды в  $e$  раз.

Для характеристики колебательной системы пользуются понятием **добротности**  $Q$ , которая при малых значениях логарифмического декремента равна

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e = \frac{\pi}{\beta T_0} = \frac{\omega_0}{2\beta} \quad (13)$$

$$Q = \frac{A_p}{A_{\omega \min}}$$

(так как затухание мало ( $\beta^2 \ll \omega_0^2$ ), то  $T$  принято равным  $T_0$ ).

Из формулы (13) следует, что добротность пропорциональна числу колебаний  $N_e$ , совершаемых системой за время релаксации.

Определив опытным путем период затухающих колебаний можно вычислить коэффициент затухания  $\beta$  и логарифмический декремент затухания  $\lambda$ . Для этого измеряют две амплитуды, отстающие во времени на  $n$  периодов, т.е.  $t = nT$ . Равенство отношений

$$\frac{A_0}{A_1} = e^{\beta T}, \frac{A_1}{A_2} = e^{\beta T}, \frac{A_2}{A_3} = e^{\beta T}, \frac{A_{n-1}}{A_n} = e^{\beta T},$$

позволяет записать

$$\frac{A_0}{A_1} \cdot \frac{A_1}{A_2} \dots \frac{A_{n-1}}{A_n} = (e^{\beta T n}) \quad (14)$$

следовательно

$$\ln \frac{A_0}{A_n} = \beta T n \quad (15)$$

Откуда коэффициент затухания

$$\beta = \frac{\ln(A_0 / A_n)}{nT} \quad (16)$$

### Ход работы

В данной работе на экране компьютера моделируются вынужденные колебания пружинного маятника и исследуются резонансные явления. В ходе эксперимента необходимо найти коэффициент затухания системы и получить амплитудную и фазовую характеристики вынужденных колебаний.

Рекомендуется следующий ход работы:

**1. Установите нужное значение коэффициента затухания.** На экране расположен ползунок, отвечающий за установку коэффициента затухания. Под ним находятся две метки. Это рекомендуемые для опытов величины коэффициента. Совместите "ползунок" коэффициента затухания с первой меткой.

**2. Измерьте период и определите частоту собственных колебаний.** Убедитесь, что выбраны свободные колебания. Затем при помощи мыши отклоните грузик из положения равновесия и измерьте время нескольких полных колебаний, нажав кнопку "Пуск" управления секундомером. Число колебаний по возможности должно быть как можно большим. Определите период колебаний и круговую частоту собственных колебаний. Эту операцию следует провести 10 раз. В дальнейшем используется среднее значение периода колебаний.

**3. Измерьте декремент затухания и определите коэффициент затухания.** Убедитесь, что выбраны свободные колебания. После этого отклоните грузик из положения равновесия и определите начальную амплитуду. Нажмите кнопку "Пуск" управления секундомером. Найдите амплитуду после нескольких полных колебаний. Определите логарифмический декремент затухания. С помощью него вычислите коэффициент затухания и добротность осциллятора.

**4. Измерьте амплитуду колебаний при разных частотах вынуждающей силы.** Выберите вынужденные колебания. Для этого нажмите кнопку "Вынужденные". Затем установите малую частоту вынуждающей силы, используя соответствующий "ползунок" или введите число в предназначенное для этого окно. Нажмите кнопку "Пуск" управления колебаниями. Дождитесь установления вынужденных коле-

баний. После этого измерьте их амплитуду. Подобные измерения следует провести для нескольких частот (около 10 значений) в интервале от нуля до двух собственных частот, причем шаг измерений вблизи резонанса должен быть меньше, чем вдали от него.

**5. По полученным данным постройте амплитудную резонансную кривую.** Постройте график зависимости амплитуды колебаний от частоты вынуждающей силы. По графику определите резонансную частоту. Сравните полученный результат с частотой свободных колебаний и с теоретическим значением резонансной частоты. Вычислите добротность осциллятора как отношение резонансной амплитуды к статическому смещению, т.е. к амплитуде колебаний при очень малой частоте. Сравните результат с полученным ранее.

**6. Постройте фазовую резонансную кривую.** Постройте график зависимости начальной фазы колебаний от частоты вынуждающей силы. Начальную фазу найдите по теоретической формуле, зная собственную частоту и коэффициент затухания. При построении этой кривой следует правильно определить четверть, в которой находится фаза.

**7. Повторите все измерения для другого значения коэффициента затухания.** Для этого совместите "ползунок" коэффициента затухания со второй меткой и проделайте все предыдущие опыты. По возможности постройте новые кривые на соответствующих графиках.

**8. Проанализируйте зависимость резонансных кривых от коэффициента затухания.** Заметьте, как изменяется высота амплитудной кривой, положение её максимума и вид фазовой кривой при изменении коэффициента затухания.

1. Вычислить:

а) Период колебаний:  $T = \frac{t}{n}$

б) Циклическую частоту:  $\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (с}^{-1}\text{)}$

в) декремент затухания:  $\ln \frac{A_0}{A_n}$

г) коэффициент затухания  $\beta = \frac{\ln(A_0 / A_n)}{nT} \text{ (с}^{-1}\text{)}$

д) коэффициент сопротивления среды:  $r = 2m\beta$

е) логарифмический декремент затухания:  $\lambda = \beta T$

ж) добротность  $Q$ .

2. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1.

Начальные условия	Свободные затухающие колебания										
	$\beta =$										
$T$											
$\omega$											
$\delta$											
$\beta$											
$Q$											
	Вынужденные колебания										
$\omega$											
$A$											
$Q$											

### Контрольные вопросы

1. Что называют свободными колебаниями?
2. Какие колебания называются гармоническими? Записать уравнение.
3. Получить дифференциальные и кинематические уравнения свободных гармонических и затухающих колебаний.
4. Какова связь амплитуды и фазы смещения, скорости и ускорения при прямолинейных гармонических колебаниях?
5. Дайте определения амплитуды, фазы, периода, частоты, циклической частоты колебания.
6. Выведите формулы для скорости и ускорения гармонически колеблющейся точки как функции времени.
7. От чего зависят амплитуда и начальная фаза гармонических механических колебаний?
8. Выведите и прокомментируйте формулы для кинетической, потенциальной и полной энергии при гармонических колебаниях.
9. Чему равно отношение полной энергии гармонического колебания к максимальному значению возвращающей силы, вызывающей это колебание?
10. Как можно сравнить между собой массы тела, измеряя частоты колебаний при подвешивании этих масс к пружине?
11. Что называется гармоническим осциллятором? Что называется пружинным маятником?
12. Запишите дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Проанализируйте их для механических и электромагнитных колебаний.
13. Как изменяется частота собственных колебаний с увеличением массы колеблющегося тела?
14. По какому закону изменяется амплитуда затухающих колебаний? Являются ли затухающие колебания периодическими?

15. Почему частота затухающих колебаний должна быть меньше частоты собственных колебаний системы?
16. Объяснить по графику  $x = f(t)$  затухающих колебаний закон убывания амплитуды.
17. Что такое коэффициент затухания? Декремент затухания? Логарифмический декремент затухания? В чем заключается физический смысл этих величин?
18. При каких условиях наблюдается апериодическое движение?
19. Что такое автоколебания? В чем их отличие от вынужденных и свободных незатухающих колебаний? Где они применяются?
20. Что такое резонанс?

## ТЕМА: МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

#### Распределение молекул по скоростям

**Цель работы:** Изучение распределения Максвелла по скоростям при различных температурах.

#### О работе

Любая равновесная система (газ, жидкость, твёрдое тело или плазма), состоящая из молекул, подчиняющихся законам классической механики, имеет вполне определённое распределение молекул по скоростям. Это распределение зависит от температуры и массы молекул. Оно было получено Дж. Максвеллом в 1869 г. и носит его имя.

Опытное изучение распределения молекул по скоростям впервые было осуществлено О. Штерном в 1920 г. при помощи созданного им метода молекулярных пучков. В этой работе имитируется опыт Штерна.

#### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделируется опыт Штерна. В ходе опыта исследуется распределение частиц по скоростям при различных температурах.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Ввести температуру.** Температуру можно задать путём введения соответствующего числа в предназначенное для этого окно, после этого нажать кнопку "Условия заданы". Рекомендуется установить 1500 К.

**2. Ввести угловую скорость вращения цилиндров.** Для того чтобы задать угловую скорость вращения цилиндров, введите число в соответствующее окно. Рекомендуется проводить опыт при 1000 рад/с.

**3. Получить гистограмму распределения частиц по скоростям.** Для этого запустите установку, нажав кнопку "Пуск". В ходе эксперимента в соответствующем окне строится гистограмма распределения вылетевших частиц по скоростям. Для того чтобы подробно ознакомиться с результатами опыта, следует нажать левую кнопку мыши на этом окне. Опыт продолжать до тех пор, пока число частиц не станет достаточно большим, и проявятся статистические закономерности. Нажмите кнопку "Стоп" и запишите полученные результаты. Обратите внимание на масштаб, с которым строится гистограмма. Пронаблюдайте процесс оседания частиц на стенку внешнего цилиндра.

**4. Определить наиболее вероятную скорость.** По гистограмме найдите наиболее вероятную скорость. Она приблизительно соответствует середине интервала, на который приходится наибольшее число частиц.

**5. Прodelать опыт для другой температуры.** Нажмите кнопку "Изменить условия" и введите новое значение температуры (рекомендуется проводить опыт при 3000 К). После этого нажмите кнопку "Условия заданы".

**6. Построить экспериментальные гистограммы.** Постройте гистограммы для каждого значения температуры на одном графике, в одном и том же скоростном масштабе.

**7. Построить теоретические гистограммы.** Для каждого значения температуры, зная наиболее вероятную скорость и формулу двумерного распределения Максвелла, вычислите теоретическое число частиц в каждом скоростном интервале. Отложите полученные теоретические зависимости на том же графике, где были построены экспериментальные.

Таблица 8.1.

№ п/п	T	$\omega$	$v_B$

### Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории газов. Запишите уравнение состояния идеального газа.
2. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов и поясните его.
3. Каков физический смысл функции распределения молекул по скоростям? по энергиям?
4. Как, зная функцию распределения молекул по скоростям, перейти к функции распределения по энергиям?
5. Как определяется наиболее вероятная скорость?
6. Во сколько раз и как изменится средняя скорость движения молекул при переходе от кислорода к водороду?
7. Что такое энергия теплового движения молекул идеального газа? Что называется числом степеней свободы молекул газа? Какие значения может принимать число степеней свободы молекул идеального газа?

*ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10*  
**Изучение фазового перехода порядок – беспорядок**

**Цель работы:** Изучение фазового перехода второго рода типа порядок - беспорядок и определение изменения энтропии при фазовом переходе и при нагревании.

**О работе**

В природе существуют различные скачкообразные изменения состояния вещества, называемые фазовыми превращениями. К числу таких превращений относятся плавление и отвердевание, испарение и конденсация, переход металлов в сверхпроводящее состояние и обратный переход и так далее.

Одним из фазовых переходов является превращение порядок - беспорядок в сплавах, сущность которого заключается в переходе от упорядоченного расположения атомов разных компонентов при низких температурах к их неупорядоченному расположению при высоких температурах.

Переход порядок - беспорядок широко исследуется в наше время не только из-за его важности в материаловедении, но и ввиду того, что для его изучения можно применить весьма простую модель (модель Изинга), и следовательно именно этот переход можно наиболее детально изучить математически, что важно для создания пока ещё отсутствующей общей теории фазовых переходов.

В этой работе рассматривается переход порядок - беспорядок в двумерной кристаллической решётке, измеряется энтропия кристалла при разных температурах.

**Ход работы**

В данной работе моделируется двумерный кристалл с центрированной квадратной решёткой, узлы которой заполняются частицами разного сорта. В работе следует при каждой заданной температуре пересчитать число частиц каждого сорта на обеих подрешётках и вычислить параметр порядка и энтропию.

Рекомендуется следующий ход работы:

**1. Ввести концентрацию атомов определенного сорта.** Концентрацию атомов сорта А можно задать путём введения соответствующего числа в предназначенное для этого окно.

**2. Ввести приведённую температуру.** Приведённую температуру  $T / T_c$  (температуру в безразмерных единицах) можно задать путём введения числа в предназначенное для этого окно.

**3. Пересчитать на экране число частиц каждого сорта.** На экране изображена центрированная квадратная решётка, узлы которой за-

полнены частицами разного сорта (здесь они различаются цветом). Следует пересчитать число частиц каждого сорта на обеих подрешётках.

**4. Вычислить при данной температуре параметр порядка и энтропию.** Для вычислений воспользоваться соответствующими формулами

**5. Прodelать этот опыт для 10 значений приведённой температуры.** При данной концентрации провести опыт для 10 значений приведенной температуры от 0,5 до 1.

**6. Построить график зависимости параметра порядка и энтропии от температуры.** Выберите масштаб на координатных осях так, чтобы график занимал всю площадь листа.

**7. Прodelать опыты для 5 различных концентраций от 0,1 до 0,5.** При каждой концентрации провести опыты для 10 значений приведенной температуры.

**8. Построить график зависимости параметра порядка от концентрации.** Для этого взять максимальное значение параметра порядка.

Таблица 10.1

Начальные условия.	n	T/T <sub>C</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>
1	0,1	0,50		
2		0,55		
3		0,60		
4		0,65		
5		0,70		
·		·		
·		·		
·		·		
10		1		
1		0,2		
2				
·				
·				
10				
·	·			
·	·			
·	·			
1	0,5			
2				
·				
·				
10				

$$a = \sqrt[3]{\frac{n\mu}{k\rho N_A}} \approx \sqrt[3]{n}$$

$$S = k \ln W = C_V \ln T$$

$$C_V = 3R$$

### Контрольные вопросы:

1. Что такое узлы кристаллической решетки?
2. В чем заключается анизотропность монокристаллов?
3. Что такое капиллярность?
4. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
5. Как можно классифицировать кристаллы?
6. Что такое ионная связь? Ковалентная связь?
7. Какие типы кристаллографических систем Вам известны?
8. Как получить закон Дюлонга и Пти исходя из классической теории теплоемкости?
9. Что такое фонон? Зачем понадобилась его введение? Каковы его свойства?
10. Что такое фаза? Фазовый переход?
11. Что называется фазовым переходом I рода? Что изменяется при фазовом переходе I рода?
12. Чем отличается фазовый переход I рода от фазового перехода II рода?
13. Чем отличаются по зонной теории полупроводники и диэлектрики? Металлы и диэлектрики?
14. Когда по зонной теории твердое тело является проводником электрического тока?
15. Чем отличаются энергетические состояния электронов в изолированном атоме и кристалле? Что такое запрещенные и разрешенные энергетические зоны?
16. Как объяснить увеличение проводимости полупроводников с повышением температуры?
17. Чем обусловлена проводимость собственных полупроводников?
18. Почему уровень Ферми в собственном полупроводнике расположен в середине запрещенной зоны? Доказать это положение.
19. Каков механизм электронной примесной проводимости?
20. Почему при достаточно высоких температурах в примесных полупроводниках преобладает собственная проводимость?

## ТЕМА: ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.

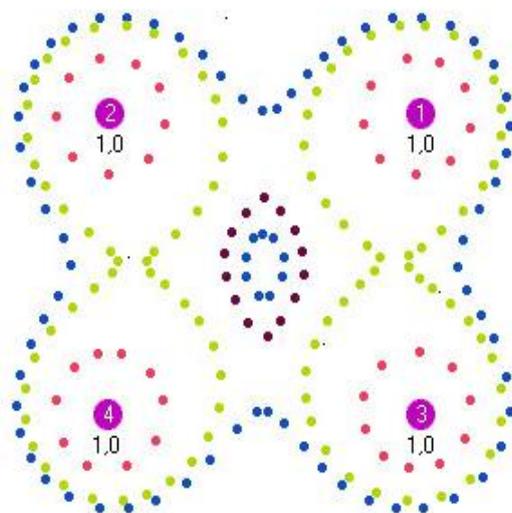
### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

#### Изучение электростатического поля

**Цель работы:** Изучение основных свойств электростатического поля и построение системы эквипотенциальных поверхностей для нескольких простых полей.

#### О работе

В данной работе исследуется электростатическое поле, созданное несколькими неподвижными точечными зарядами, которые могут располагаться произвольным образом в предназначенной для этого области экрана. В ходе опыта строится система линий равного потенциала (эквипотенциальных линий), и оценивается напряженность электрического поля в нескольких точках.



#### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделируется электростатическое поле, созданное неподвижными электрическими зарядами. В ходе опыта нужно построить систему эквипотенциальных поверхностей.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Расставить заряды и присвоить им значения.** Нажмите на объекте, изображающем заряд, левую кнопку мыши и, не отпуская её, установите этот объект в нужную позицию. Величина заряда задается введением числа в предназначенное для этого окно. После того как все тела размещены, и все заряды присвоены, нажмите кнопку «Условия заданы».

**2. Исследовать электростатическое поле данных зарядов.** Перемещая курсор мыши по экрану, следите за показаниями гальванометра. Исследуйте, как распределяется потенциал, каковы его значения. Подумайте, какие значения потенциала выгодно взять для построения эквипотенциальных поверхностей.

**3. Построить 4-6 поверхностей равного потенциала.** Ввести в специальное окно гальванометра значение потенциала  $\phi_0$ , относительно которого строится эквипотенциальная поверхность, затем выбрать цвет, которым эта поверхность будет изображена. Следя за стрелкой гальванометра, отмечать точки равного потенциала на экране, нажимая левую кнопку мыши. При нажатии правой кнопки мыши, появляется "ластик",

которым можно удалить ошибочно поставленные точки. Построить 4 - 6 поверхностей равного потенциала. После этого нажать кнопку "Сохранить в файл", и сохранить полученный в ходе опыта рисунок в формате bitmap (bmp).

**4. Провести опыт при другой расстановке и иных значениях зарядов.** Нажать кнопку "Изменить условия", расставить заряды, присвоить им значения. Построить 4 - 6 поверхностей равного потенциала.

**5. Оценить напряженность электростатического поля в двух точках.** Используя полученное в ходе опыта изображение, оцените напряженность электрического поля в двух точках по приближенной формуле:  $E \approx \Delta\phi / \Delta l$ , где  $\Delta\phi$  - разность потенциалов между двумя ближайшими к данной точке эквипотенциальными линиями, а  $\Delta l$  - кратчайшее расстояние между этими линиями вблизи данной точки.

### **Контрольные вопросы:**

1. Дайте определения напряженности и потенциала данной точки электрического поля и разности потенциалов двух точек поля. Каковы их единицы?
2. Какова связь между напряженностью и потенциалом? Выведите ее и объясните. Каков физический смысл этих понятий?
3. Приведите графики зависимостей  $E(r)$  и  $\phi(r)$  для равномерно заряженной сферической поверхности. Дайте их объяснение и обоснование.
4. Как доказать, что электростатическое поле является потенциальным?
5. Что называется циркуляцией вектора напряженности?
6. Чему равно отношение напряженностей электрических полей в точке А, лежащей на продолжении оси диполя, и в точке В, лежащей на перпендикуляре, проходящем через середину О оси этого диполя, если  $OA=OB$ ?
7. В чем заключается физический смысл теоремы Гаусса для электростатического поля в вакууме?
8. Что такое линейная, поверхностная, объемная плотности зарядов?
9. Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
10. Что такое поляризованность?
11. Что показывает диэлектрическая проницаемость среды?
12. Выведите связь между диэлектрическими восприимчивостью вещества и проницаемостью среды.
13. В чем различие поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
14. Как определяется вектор электрического смещения? Что он характеризует?
15. Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
16. Выведите и прокомментируйте условия для векторов  $E$  и  $D$  на границе раздела двух диэлектрических сред.

*ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12*  
**Измерение элементарного заряда**  
(опыт Милликена)

**Цель работы:** Изучение движения заряженной капли в электрическом поле и определение элементарного электрического заряда (опыт Милликена).

**О работе**

В начале нашего века в 1909 г американский физик Р. Милликен с большой точностью определил заряд электрона. В закрытое пространство между горизонтально расположенными пластинами конденсатора Милликен вводил мельчайшие капельки масла. При разбрызгивании капельки электризовались, и их можно было устанавливать неподвижно, подбирая величину и знак напряжения в конденсаторе. Равновесие наступало при условии



$$P' = e'E \quad (1)$$

здесь  $e'$  - заряд капельки,  $P'$  - результирующая силы тяжести и архимедовой силы, равная

$$P' = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g \quad (2)$$

( $\rho$  – плотность капельки,  $r$  - ее радиус,  $\rho_0$  - плотность воздуха).

Из формул (1) и (2), зная  $r$ , можно было найти  $e$ . Для определения радиуса измерялась скорость  $\vartheta_0$  равномерного падения капельки в отсутствие поля. Равномерное движение капельки устанавливается при условии, что сила  $P'$  уравнивается силой сопротивления  $F = 6\pi\eta r\vartheta$  ( $\eta$  - вязкость воздуха):

$$P' = 6\pi\eta r\vartheta_0 \quad (3)$$

Движение капельки наблюдалось с помощью микроскопа. Для измерения  $\vartheta_0$  определялось время, за которое капля проходила расстояние между двумя нитями, видимыми в поле зрения микроскопа.

Точно зафиксировать равновесие капельки очень трудно. Поэтому вместо поля, отвечающего условию (1), включалось такое поле, под действием которого капля начинала двигаться с небольшой скоростью вверх. Установившаяся скорость подъема  $v_E$  определяется из условия, что сила  $P'$  и сила  $6\pi\eta r\vartheta_0$  в сумме уравнивают силу  $e'E$ :

$$P' + 6\pi\eta r\vartheta_0 = e'E \quad (4)$$

Исключив из уравнений (2), (3) и (4)  $P'$  и  $r$ , получим выражение для  $e'$ :

$$e' = 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 \mathcal{G}_0}{(\rho - \rho_0)g} \frac{v_0 + \mathcal{G}_E}{E}}$$

(в эту формулу Милликен вносил поправку, учитывающую, что размеры капелек были сравнимы с длиной свободного пробега молекул воздуха).

Поскольку капли во время опытов заряжались случайным образом, Р. Милликен смог определить заряд электрона как наименьшее значение заряда капли.

В этой работе моделируется опыт Милликена по движению заряженной капли со случайным зарядом в электрическом поле и поле силы тяжести.

### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделируется движение заряженной капли в электрическом поле и поле силы тяжести. В ходе опыта необходимо определить элементарный заряд - заряд электрона.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Измерить 10 раз время падения капли в поле силы тяжести.** Убедитесь, что в соответствующем текстовом окне установлено нулевое значение напряженности поля. Затем измерьте время свободного падения капли в промежутке между фиксированными метками, используя кнопки управления каплей и секундомером. Опыт следует провести 10 раз.

**2. Вычислить среднее значение соответствующей скорости.** Зная пройденный путь и среднее время движения, вычислите среднее значение скорости свободно падающей капли.

**3. Измерить время движения частицы при напряженности поля 4000 В/м.** При напряженности поля 4000 В/м измерить время движения частицы в промежутке между фиксированными метками.

**4. Провести опыт 60 - 80 раз.** Опыт следует провести большое число раз, так как, во-первых, заряд частицы может иметь несколько различных значений, а во-вторых, даже при каждом фиксированном значении заряда результаты измерения времени будут различаться из-за неточности включения и выключения секундомера.

**5. Разбить результаты измерений на группы.** Результаты измерений необходимо разбить на группы, внутри которых они различаются не более чем на несколько десятых долей секунды ( $\pm 0,2$  с). Каждая такая группа соответствует какому-то определенному значению заряда.

**6. Найти для каждой группы среднее время движения и среднюю скорость.** Для каждой группы следует найти среднее время движения и соответствующую среднюю скорость. Может встретиться

группа результатов, соответствующих нулевому заряду. В этом случае частица движется вниз под действием только силы тяжести.

**7. Вычислить заряд капли для каждой выделенной группы результатов.** Вычисленные значения зарядов должны отличаться друг от друга умножением на различные целые числа. Минимальный заряд и является элементарным зарядом, а все остальные заряды равны какому-то целому числу элементарных зарядов.

Таблица 12.1.

Начальные условия	$\rho$			$\rho_0$			$\eta$		
$E=0$	$S, \text{см}$								
	$t, \text{С}$								
	$v_0$								
	$v_{0cp}$								
$E=4000\text{В/м}$	$S, \text{см}$								
	$t, \text{с}$								
	$v_E$								
	$v_{Ecp}$								

### Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте закон сохранения заряда. Приведите примеры проявления закона.
2. Запишите, сформулируйте и объясните закон Кулона.
3. Какие поля называют электростатическими?
4. Что такое напряженность  $E$  электростатического поля?
5. Каково направление вектора напряженности  $E$ ? Единица напряженности в СИ?
6. Что такое поток вектора  $E$ ? Единица поток вектора напряженности в СИ?
7. Электрический диполь помещен внутрь замкнутой поверхности. Каков поток  $\Phi_E$  сквозь эту поверхность? Почему?
8. Пользуясь принципом суперпозиции, найдите в поле двух точечных зарядов  $+q$  и  $+2q$ , находящихся на расстоянии  $1$  м друг от друга, точку, где напряженность поля равна нулю.
9. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?
10. Каковы возможные значения  $l$  и  $m_l$  для главного квантового числа  $n=5$ ?
11. Сколько различных состояний соответствует  $n=4$ ?
12. Каков квантово-механический смысл первого боровского радиуса?

13. Сравните плотности вероятности обнаружения электрона в основном состоянии атома водорода согласно теории Бора и квантовой механики.
14. Почему атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в различных состояниях?
15. Каковы правила квантования орбитального механического и собственного механического моментов импульса электрона? их проекций на направление внешнего магнитного поля?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

### Изучение лампового диода

**Цель работы:** Изучение термоэлектронной эмиссии и построение вольтамперной характеристики лампового диода.

#### О работе

Если сообщить электронам в металлах энергию, необходимую для преодоления работы выхода, то часть электронов может покинуть металл, в результате чего наблюдается явление испускания электронов, или **электронной эмиссии**. В зависимости от способа сообщения электронам энергии различают термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную, ионно-электронную и автоэлектронную эмиссии.

**1. Термоэлектронная эмиссия** — это испускание электронов нагретыми металлами. Концентрация свободных электронов в металлах достаточно высока, поэтому даже при средних температурах вследствие распределения электронов по скоростям (по энергиям) некоторые электроны обладают энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера на границе металла. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, растет и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным.

Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью простейшей двухэлектродной лампы — **вакуумного диода**, представляющего собой откачанный баллон, содержащий два электрода: катод  $K$  и анод  $A$ . В простейшем случае катодом служит нить из тугоплавкого металла (например, вольфрама), накаливаемая электрическим током. Анод чаще всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод. Если диод включить в цепь, как это показано на рис. 1, то при накаливании катода и подаче на анод положительного напряжения (относительно катода) в анодной цепи диода возникает ток. Если поменять полярность батареи  $B_a$ , то ток прекращается, как бы сильно катод ни накаливали. Следовательно, катод испускает отрицательные частицы — электроны.

Если поддерживать температуру накаленного катода постоянной и снять зависимость анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$ , — **вольтамперную характеристику** (рис. 2), то оказывается, что она не является линейной, т. е. для вакуумного диода закон Ома не выполняется. Зависимость термоэлектронного тока  $I$  от анодного напряжения в области малых положительных значений  $U$  описывается **законом трех вторых** (установленным русским физиком С. А. Богуславским (1883—1923) и американским физиком И. Ленгмюром (1881—1957)):

$$I = BU^{3/2},$$

где  $B$ —коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

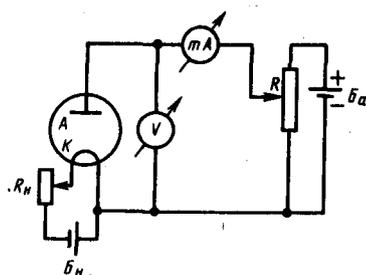


Рис 1.

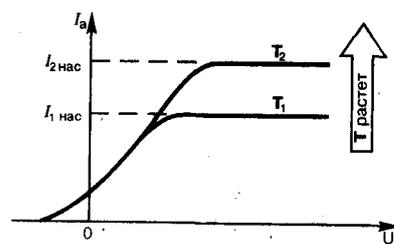


Рис 2.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает до некоторого максимального значения  $I_{\text{нас}}$ , называемого **током насыщения**. Это означает, что почти все электроны, покидающие катод, достигают анода, поэтому дальнейшее увеличение напряженности поля не может привести к увеличению термоэлектронного тока. Следовательно, плотность тока насыщения характеризует эмиссионную способность материала катода.

Плотность тока насыщения определяется **формулой Ричардсона — Дешмана**, выведенной теоретически на основе квантовой статистики:

$$j_{\text{нас}} = CT^2 e^{-A/(kT)},$$

где  $A$  — работа выхода электронов из катода,  $T$  — термодинамическая температура,  $C$  — постоянная, теоретически одинаковая для всех металлов (это не подтверждается экспериментом, что, по-видимому, объясняется поверхностными эффектами). Уменьшение работы выхода приводит к резкому увеличению плотности тока насыщения. Поэтому применяются оксидные катоды (например, никель, покрытый оксидом щелочноземельного металла), работа выхода которых равна 1—1,5 эВ.

На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики для двух температур катода:  $T_1$  и  $T_2$ , причем  $T_2 > T_1$ . С повышением температуры катода испускание электронов с катода интенсивнее, при этом увеличивается и ток насыщения. При  $U_a=0$  наблюдается анодный ток, т. е. некоторые электроны, эмитируемые катодом, обладают энергией, достаточной для преодоления работы выхода и достижения анода без приложения электрического поля.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в приборах, в которых необходимо получить поток электронов в вакууме, например в электронных лампах, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и т.д. Электронные лампы широко применяются в электро- и радиотехнике, автоматике и телемеханике для выпрямления переменных токов, усиления электрических сигналов и переменных токов, генерирования электромагнитных колебаний в т.д. В зависимости от назначения в лампах используются дополнительные управляющие электроды.

**2. Фотоэлектронная эмиссия** — это эмиссия электронов из металла под действием света, а также коротковолнового электромагнитного излучения (например, рентгеновского). Основные закономерности этого явления будут разобраны при рассмотрении фотоэлектрического эффекта.

**3. Вторичная электронная эмиссия** — это испускание электронов поверхностью металлов, полупроводников или диэлектриков при бомбардировке их пучком электронов. Вторичный электронный поток состоит из электронов, отраженных поверхностью (упруго и неупруго отраженные электроны), и «истинно» вторичных электронов — электронов, выбитых из металла, полупроводника или диэлектрика первичными электронами.

Отношение числа вторичных электронов  $n_2$  к числу первичных  $n_1$ , вызвавших эмиссию, называется **коэффициентом вторичной электронной эмиссии**:

$$\delta = n_2 / n_1.$$

Коэффициент  $\delta$  зависит от природы материала поверхности, энергии бомбардирующих частиц и их угла падения на поверхность. У полупроводников и диэлектриков  $\delta$  больше, чем у металлов. Это объясняется тем, что в металлах, где концентрация электронов проводимости велика, вторичные электроны, часто сталкиваясь с ними, теряют свою энергию и не могут выйти из металла. В полупроводниках и диэлектриках из-за малой концентрации электронов проводимости столкновения вторичных электронов с ними происходят гораздо реже и вероятность выхода вторичных электронов из эмиттера возрастает в несколько раз.

Для примера на рис. 3 приведена качественная зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\delta$  от энергии  $E$  падающих электронов для КС1. С увеличением энергии электронов  $\delta$  возрастает, так как первичные электроны все глубже проникают в кристаллическую решетку и, следовательно, выбивают больше вторичных электронов. Однако при некоторой энергии первичных электронов  $\delta$  начинает уменьшаться. Это связано с тем, что с увеличением глубины проникновения первичных электронов вторичным все труднее вырваться на поверхность. Значение  $\delta_{\max}$  для КС1 достигает  $\approx 12$  (для чистых металлов оно не превышает 2).

Явление вторичной электронной эмиссии используется в **фотоэлектронных умножителях (ФЭУ)**, применимых для усиления слабых электрических токов. ФЭУ представляет собой вакуумную трубку с фотокатодом К и анодом А, между которыми расположено несколько электродов — **эмиттеров** (рис. 4). Электроны, вырванные из фотокатода под действием света, попадают на эмиттер  $\mathcal{E}_1$ , пройдя ускоряющую разность потенциалов между К и  $\mathcal{E}_1$ . Из эмиттера  $\mathcal{E}_1$  выбивается  $\delta$  электронов. Усиленный таким образом электронный поток направляется на эмиттер

$\mathcal{E}_2$ , и процесс умножения повторяется на всех последующих эмиттерах. Если ФЭУ содержит  $n$  эмиттеров, то на аноде А, называемом **коллектором**, получается усиленный в  $\delta^n$  раз фотоэлектронный ток.

**4. Автоэлектронная эмиссия** — это эмиссия электронов с поверхности металлов под действием сильного внешнего электрического поля. Эти явления можно наблюдать в откачанной трубке, конфигурация электродов которой (катод — острие, анод — внутренняя поверхность трубки) позволяет при напряжениях примерно  $10^3$  В получать электрические поля напряженностью примерно  $10^7$  В/м. При постепенном повышении напряжения уже при напряженности поля у поверхности катода примерно  $10^5$  —  $10^6$  В/м возникает слабый ток, обусловленный электронами, испускаемыми катодом. Сила этого тока увеличивается с повышением напряжения на трубке. Токи возникают при холодном катоде, поэтому описанное явление называется также **холодной эмиссией**. Объяснение механизма этого явления возможно лишь на основе квантовой теории.

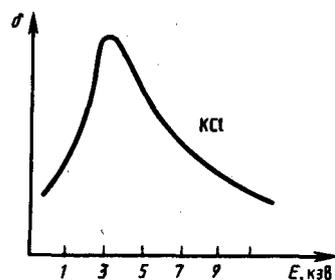


Рис. 3

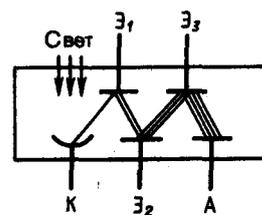


Рис 4

Для изучения термоэлектронной эмиссии применяется ламповый диод, то есть вакуумная лампа, состоящая из двух электродов, между которыми приложено электрическое поле, ускоряющее или тормозящее электроны, вылетевшие вблизи одного из электродов.

В этом практикуме моделируется работа вакуумного диода.

### Ход работы

На экране компьютера моделируется работа вакуумного диода. В ходе опыта исследуется работа диода и строится его вольтамперная характеристика.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Измерить число электронов, достигших анода за 10 секунд.** Убедитесь, что значение температуры, отображенное в соответствующем окне, равно 2000 К. Затем введите значение напряжения 150 В в предназначенное для этого окно. Нужно подождать некоторое время, пока не возникнет установившийся поток частиц, а затем нажать кнопку "Пуск", запускающую секундомер и счетчик частиц, которые автоматически выключаются через 10 секунд. После выключения в

соответствующей области экрана показывается итоговое число электронов, которые за это время достигли анода. Опыт следует провести 5 раз.

**2. Прodelать опыты при напряжении от 150 до - 5 В.** Рекомендуется проводить измерения с интервалом 10 В. При каждом напряжении опыт следует провести 5 раз.

**3. Исследовать более детально области насыщения и запира-ния.** При приближении к значениям насыщения и запира-ния рекомендуется проводить с интервалом 1 В. При каждом напряжении опыт следует провести 5 раз.

**4. Вычислить среднее число частиц при каждом напряжении.**

**5. Построить вольтамперную характеристику для данной температуры катода.** Необходимо построить график зависимости среднего числа достигших анода электронов от напряжения.

**6. Построить график зависимости числа частиц от напряжения в степени три вторых.** Для значений напряжения вдали от насыщения постройте зависимость числа достигших анода электронов от напряжения в степени три вторых. В области действия закона Богуславского - Ленгмюра данная зависимость должна быть линейной.

**7. Прodelать описанные выше опыты при температуре катода 2100 К.** Введите температуру катода в соответствующее окно и прodelайте всю описанную выше последовательность действий. Оцените изменение тока насыщения при этой новой температуре по сравнению со старым значением.

Таблица 14.1

Начальные условия		$t, c$															$T, c$	
		10																
№ П/П	$U, B$																	
	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	-5	
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
$N_{cp}$																		

Таблица 14.2.

Начальные условия		$t, c$															$T, c$	
		10																
№	$U_{нас}, B$										$U_{зап}, B$							
	1																	
2																		
3																		
4																		
5																		
$N_{cp}$																		

### Контрольные вопросы:

1. Подчиняется ли электрический ток в газах и электролитах закону Ома?
2. Можно ли изменить силу тока насыщения вакуумного диода?
3. Каким образом можно вырвать электроны из холодного катода? Как называется это явление?
4. Дайте объяснение качественной зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии диэлектрика от энергии падающих электронов.
5. К какому типу газового разряда относится молния?
6. Может ли возникнуть ток насыщения при самостоятельном газовом разряде?
7. Охарактеризуйте процесс ионизации; рекомбинации.
8. В чем отличие самостоятельного газового разряда от несамостоятельного? Каковы условия, необходимые для его существования? При каком условии несамостоятельный разряд в газе переходит в самостоятельный?
9. Поясните границы применимости закона Ома.
10. Приведите основные свойства плазмы. Каковы возможности ее применения?

*ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15*  
**Изучение намагниченности парамагнетиков**

**Цель работы:** Изучение теории парамагнетизма и проверка закона Кюри для парамагнетиков.

**О работе**

К парамагнетикам относятся вещества, атомы которых имеют магнитные моменты. В отсутствие внешнего поля эти магнитные моменты ориентированы беспорядочно вследствие хаотического теплового движения, и поэтому результирующая намагниченность парамагнетика равна нулю. При появлении внешнего поля магнитные моменты атомов ориентируются преимущественно по полю, поэтому появляется результирующая намагниченность, направление которой совпадает с направлением поля.

Тепловое движение разориентирует магнитные моменты, поэтому при достаточно высоких температурах и слабых магнитных полях степень ориентации по полю магнитных моментов мала, мала и восприимчивость парамагнетиков. В этом случае выполняется закон Кюри, согласно которому парамагнитная восприимчивость обратно пропорциональна абсолютной температуре.

При сильных полях и небольших температурах достигается сильная ориентация магнитных моментов атомов по полю, может быть даже достигнуто насыщение, когда все магнитные моменты ориентируются по полю.

В работе моделируется поведение парамагнетика во внешнем магнитном поле, изучается зависимость его намагниченности от температуры и напряжённости поля.

**Ход работы**

В данной лабораторной работе моделируется поведение парамагнетика во внешнем магнитном поле. На экране при помощи стрелок изображаются атомы парамагнетика, причем направление стрелки указывает на направление магнитного момента данного атома. В ходе опыта следует найти намагниченность вещества.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Ввести температуру.** Температуру можно задать путём введения числа в предназначенное для этого окно. В данной работе следует брать температуру в интервале от 100 до 300 К, так как при слишком низких температурах закон Кюри перестаёт выполняться, а при высоких сложно наблюдать изменение намагниченности.

**2. Измерить количество частиц, магнитные моменты которых ориентированы по полю.** Убедитесь, что напряженность поля равна 0.

Нажмите кнопку "Новое измерение". На экране отобразится количество атомов  $N_1$ , имеющих магнитный момент сонаправленный с полем.

**3. Вычислить намагниченность вещества.** Намагниченность вещества вычисляется как разность между количеством атомов, магнитные моменты которых сонаправлены с полем, и количеством атомов, магнитные моменты которых направлены против поля.

**4. При данной температуре провести опыт для 10 значений напряженности поля.** Напряженность можно задать путём введения числа в предназначенное для этого окно. Следует брать значения напряженности поля от 0 до 100 условных единиц. Вычислите намагниченность для каждого значения напряженности поля.

**5. Провести описанные выше опыты для других значений температуры.** Опыты следует проделать для 5 значений температуры.

**6. Для каждой температуры построить график зависимости  $\mu$  от  $H$ .** Все зависимости намагниченности  $\mu$  от напряженности поля  $H$  лучше построить на одном графике.

**7. Для каждой температуры найти парамагнитную восприимчивость  $\chi$ .** Парамагнитная восприимчивость представляет собой тангенс угла наклона графика зависимости  $\mu$  от  $H$ .

**8. Построить зависимость парамагнитной восприимчивости  $\chi$  от обратной температуры.** В случае справедливости закона Кюри, зависимость парамагнитной восприимчивости от обратной температуры  $1/T$  должна быть линейной.

Т		H											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
100	$N1$												
	$N2$												
	$\mu$												
	$\chi$												
150	$N1$												
	$N2$												
	$\mu$												
	$\chi$												
200	$N1$												
	$N2$												
	$\mu$												
	$\chi$												
250	$N1$												
	$N2$												
	$\mu$												
	$\chi$												
300	$N1$												
	$N2$												
	$\mu$												
	$\chi$												

### Контрольные вопросы:

1. Почему орбитальный магнитный и механический моменты электрона в атоме противоположно направлены?
2. Что называют гиромагнитным отношением?
3. Из каких магнитных моментов складывается магнитный момент атома?
4. Можно ли провести аналогию между намагничиванием диамагнетика и поляризацией диэлектрика с неполярными молекулами?
5. Можно ли провести аналогию между намагничиванием парамагнетика и поляризацией диэлектрика с полярными молекулами?
6. Что такое диамагнетики? парамагнетики? В чем различие их магнитных свойств?
7. Что такое намагниченность? Какая величина может служить ее аналогом в электростатике?
8. Запишите и объясните соотношения между векторами магнитной индукции, напряженности магнитного поля и намагниченности.
9. Объясните петлю гистерезиса ферромагнетика.
10. Что такое магнитострикция?
11. Какие ферромагнетики являются магнитомягкими? магнитожесткими? Где их применяют?
12. Каков механизм намагничивания ферромагнетиков?
13. Какую температуру для ферромагнетика называют точкой Кюри?

## ТЕМА: ОПТИКА.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

#### Изучение дифракции Фраунгофера на щели

**Цель работы:** Изучение дифракции Фраунгофера на одной щели и градуировка спектрографической щели.

#### О работе

В безграничной однородной изотропной среде волны любой природы распространяются прямолинейно. В сильно неоднородных средах наблюдается отклонение от законов геометрической оптики, которое может быть сравнительно небольшим для малых длин волн и очень сильным - для больших. Распределение интенсивности волны в пространстве при этом может быть весьма сложным.

Это явление называется дифракцией, обычно его наблюдают на различных препятствиях: непрозрачных экранах, отверстиях и т.д.

Известно, что свет имеет квантовую природу, то есть он состоит из частиц, называемых фотонами. При прохождении, например, через отверстие фотоны рассеиваются случайным образом, однако вероятность отклонения фотона на какой-либо конкретный угол является вполне определённой величиной. При большом потоке фотонов проявляется закономерность (статистическая закономерность) в их распределении, и образуется дифракционная картина, то есть вполне определённая зависимость интенсивности от угла дифракции.

#### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделируется дифракция Фраунгофера на щели. В ходе эксперимента исследуются дифракционные картины, и по ним вычисляется ширина щели.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Ввести отношение ширины щели к длине волны.** Отношение ширины щели к длине волны можно задать введением числа в предназначенное для этого окно. Рекомендуется установить это отношение равным двум.

**2. Получить гистограмму распределения фотонов по углам.** Для этого запустите установку, нажав кнопку "Пуск". В ходе эксперимента в соответствующем окне строится гистограмма распределения вылетевших фотонов по углам. Для того чтобы подробно ознакомиться с результатами опыта, следует нажать левую кнопку мыши на этом окне. Продолжайте опыт до тех пор, пока пик центрального максимума не достигнет верхней границы отведенного для гистограммы окна. Затем нажмите кнопку "Стоп". Обратите внимание на дифракционную картину, изображённую в нижней части экрана.

**3. Определить положение дифракционных минимумов.** Воспользуйтесь увеличенной гистограммой для того, чтобы найти углы, определяющие направление на дифракционные минимумы.

**4. Вычислить отношение ширины щели к длине волны.** По полученным данным вычислить отношение ширины щели к длине волны, найти среднее значение этой величины и сравнить результат с установленным значением.

**5. Прodelать опыты при других значениях отношения ширины щели к длине волны.** Проведите описанную выше последовательность действий для 3-4 значений отношения в интервале от 2 до 5.

**6. Прodelать опыт при отношении ширины щели к длине волны равном или меньшем 1.** Убедитесь, что в этом случае дифракционные минимумы отсутствуют.

Таблица 16.1.

$\frac{a}{\lambda}$ $\varphi_{\min}$						
1						
2						
3						
4						
5						

Условия дифракционного минимума для щели:

$$a \sin \varphi = \kappa \lambda \Rightarrow \frac{a}{\lambda} = \frac{\kappa}{\sin \varphi}$$

**Контрольные вопросы:**

1. Найдите положения точки на экране в случае дифракции на щели, в которых интенсивность равна нулю; интенсивность максимальна.
2. Отличается ли дифракция на щели при освещении ее монохроматическим и белым светом?
3. Какова предельная ширина щели, при которой еще будут наблюдаться минимумы интенсивности?
4. Как влияет на дифракцию Фраунгофера от одной щели увеличение длины волны и ширины щели?
5. Как изменится дифракционная картина, если увеличить общее число штрихов решетки, не меняя постоянную решетки?
6. Сколько дополнительных минимумов и максимумов возникнет при дифракции на шести щелях?
7. Почему дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр?

8. Как определить наибольший порядок спектра дифракционной решетки?
9. Как изменится дифракционная картина при удалении экрана от решетки?
10. Почему при использовании белого света только центральный максимум белый, а боковые максимумы радужно окрашены?
11. Почему штрихи на дифракционной решетке должны быть тесно расположены друг к другу?
12. Почему их должно быть большое число?
13. Запишите условие дифракционных минимумов для одной щели и главных максимумов для решетки. Каков характер этих дифракционных картин?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

### Изучение зависимости показателя преломления призмы от длины волны

**Цель работы:** Изучение дисперсии света и определение зависимости показателя преломления призмы от длины световой волны.

#### О работе

Электромагнитная, в частности световая волна в вакууме распространяется без поглощения, а скорость света в вакууме является постоянной величиной. Однако в любом веществе вследствие взаимодействия поля световой волны с заряженными частицами, входящими в его состав, электромагнитная волна, во-первых, частично поглощается, а во-вторых, скорость её распространения становится зависящей от частоты.

Это явление, называемое дисперсией, проявляется в зависимости показателя преломления вещества от длины волны и, следовательно, в пространственном разделении волн с разными частотами, то есть разных цветов.

В данной работе исследуется зависимость показателя преломления призмы от длины волны. Для всех веществ эта зависимость является довольно слабой, и количественные измерения можно проводить только с помощью достаточно точных приборов. Поэтому в данной работе выбирается абстрактное вещество с очень большой дисперсией, каких нет в природе.

#### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделируется разложение белого света в спектр при помощи призмы. В ходе опыта исследуется зависимость показателя преломления призмы от длины волны падающего света.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Измерить преломляющий угол призмы.** Для измерения преломляющего угла призмы воспользуйтесь транспортиром. Переместите транспортир в нужную область экрана, удерживая нажатой левую кнопку мыши. Измерение преломляющего угла призмы можно проводить только когда "ползунок", расположенный в нижней части экрана, находится в крайней левой позиции.

**2. Определить угол наименьшего отклонения спектральной линии красного цвета.** Используя "ползунок", расположенный в нижней части экрана, поворачивайте призму со столиком до тех пор, пока луч данного спектрального цвета будет отклоняться от падающего на призму белого луча на наименьший возможный угол - угол наименьшего отклонения. При помощи транспортира измерьте угол наименьшего отклонения для данной длины волны.

**3. Определить угол наименьшего отклонения оставшихся спектральных линий.** Выполните для оставшихся спектральных линий последовательность действий, приведенную в п. 2.

**4. Вычислить показатель преломления для каждой длины волны.**

**5. Построить график зависимости показателя преломления от длины волны.** Выберите масштаб на координатных осях так, чтобы график занимал всю площадь листа.

**6. Определите дисперсию призмы для трёх разных длин волн по наклону графика зависимости показателя преломления от длины волны.** Дисперсия графически представляет собой тангенс угла наклона касательной, проведённой к данной точке кривой.

**7. Определить среднюю дисперсию для данной призмы.** Среднюю дисперсию для данной призмы определите как отношение разности показателей преломления, соответствующих максимальной и минимальной длинам волн, к разности длин этих волн.

Таблица 17.1.

Начальные условия.		A=					
$\varphi$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$

Рабочие формулы для расчета параметров призмы и коэффициента преломления  $n$ :

$$\varphi = A(n-1)$$

$$n = \varphi/A + 1$$

### Контрольные вопросы:

1. Может ли возникнуть явление полного отражения, если свет проходит из воды в стекло?
2. Сформулируйте и поясните основные законы оптики.
3. В чем заключается физический смысл абсолютного показателя преломления среды? Что такое относительный показатель преломления?
4. При каком условии наблюдается полное отражение?
5. В чем заключается принцип работы световодов?
6. Что такое дисперсия света?
7. Как связаны между собой преломляющий угол призмы и угол отклонения лучей ею?
8. Что показывает дисперсия вещества?
9. Чем отличается нормальная дисперсия от аномальной?

10. По каким признакам можно отличить спектры, полученные с помощью призмы и дифракционной решетки?
11. В чем заключаются основные положения и выводы электронной теории дисперсии света?
12. Поясните, что вы понимаете под световым лучом?
13. Что такое линза? Какие они бывают?
14. Как осуществляется построение изображения предметов в линзах?
15. Выведите формулу тонкой линзы.
16. Что такое фокусное расстояние линзы? Оптическая сила линзы? Фокальная плоскость линзы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18

### Изучение фотоэффекта

**Цель работы:** Изучение теории фотоэффекта, снятие вольт - амперной характеристики фотодиода и определение постоянной Планка по задерживающему потенциалу.

#### О работе

Фотоэффект был открыт в конце прошлого века Г. Герцем и детально исследован А.Г.Столетовым. Кванты света при взаимодействии с некоторыми веществами могут вырывать из атомов этих веществ электроны. Это явление называется фотоэффектом.

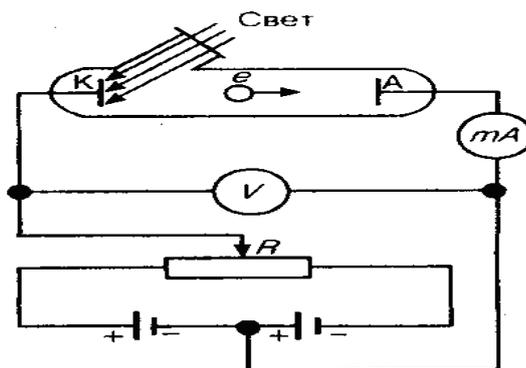
Если освобожденные электроны выходят за пределы веществ, то фотоэффект называется внешним.

Если электроны, освобожденные от связи с атомом, остаются в пределах веществ, то фотоэффект называется внутренним.

А.Г. Столетовым экспериментально были установлены следующие законы фотоэффекта:

- 1) Фотоэффект наблюдается при освещении светом только отрицательно заряженных пластин - электродов
- 2) Фотоэффект наблюдается при освещении преимущественно коротковолновой частью спектра
- 3) Сила фототока пропорциональна световому потоку
- 4) Скорость освобожденных фотоэлектронов зависит только от частоты падающего света.

Все экспериментальные закономерности были объяснены на основе квантовых представлений о свете.



Квантовая теория фотоэффекта была создана А.Эйнштейном в 1905 г. Это теория явилась одной из предпосылок для создания квантовой механики в середине 20-х годов нашего столетия. Данная работа моделирует опыты по фотоэффекту.

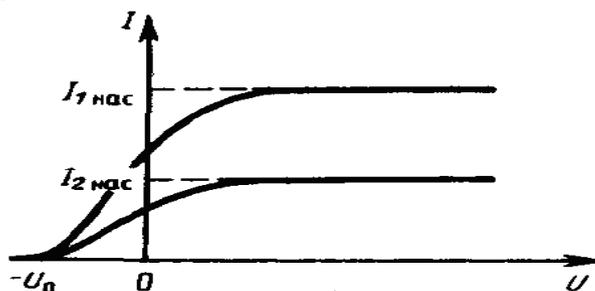
Основное уравнение фотоэффекта – уравнение Эйнштейна - представляет собой закон сохранения энергии и устанавливает связь между энергией кванта света, вызывающего фотоэффект, работой выхода электронов из металла и максимальной энергией вылетающего электрона.

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

Минимальная частота света, при котором еще возможен фотоэффект, называется порогом или красной границей фотоэффекта

$$\nu = \frac{A}{h}$$

Приборы, устройство которых основано на явлении фотоэффекта, называются фотоэлементами. Вакуумный фотоэлемент изготавливается в виде стеклянного баллона, внутренняя поверхность которого, примерно наполовину, покрыта слоем чувствительного вещества, образующим «фотокатод». Анодом служит металлическая петелька или сетка, помещенная в центре баллона. Электрические выводы от анода и катода вмонтированы в цоколь фотоэлемента.



Если между анодом и катодом создать электрическое поле, то вырванные светом фотоэлектроны будут ускоряться полем и возникает электрический ток, измеряемый микроамперметром. Зависимость силы тока от приложенного напряжения называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента.

### Ход работы

В данной лабораторной работе на экране компьютера моделируется явление фотоэффекта. В ходе опыта исследуются вольт - амперные характеристики фотодиода, и определяется постоянная Планка.

**Рекомендуется следующий ход работы:**

**1. Ввести значение длины волны падающего света.** Длину волны падающего света можно задать введением числа в предназначенное для этого окно. Рекомендуется установить эту величину равной 400 нм.

**2. Ввести значение напряжения.** Анодное напряжение можно задать введением числа в предназначенное для этого окно. Рекомендуется установить эту величину равной 15 В.

**3. Измерить число электронов, достигших анода за 10 секунд.** Нужно подождать некоторое время, пока не возникнет установившийся поток частиц, а затем нажать кнопку "Пуск", запускающую секундомер и счетчик частиц, которые автоматически выключаются через 10 секунд. После выключения в соответствующей области экрана показывается итоговое число электронов, которые за это время достигли анода. Опыт следует провести 5 раз.

**4. Прodelать опыты при напряжении от 15 до -2 В.** Рекомендуется проводить измерения с интервалом 1 В. При каждом напряжении опыт следует провести 5 раз.

**5. Исследовать более детально области насыщения и задерживающего напряжения.** При приближении к значениям насыщения и запирающего, измерения рекомендуется проводить с интервалом 0,1 В. При каждом напряжении опыт следует провести 5 раз.

**6. Вычислить среднее число частиц при каждом напряжении.**

**7. Построить вольт - амперную характеристику для данной длины волны.** Необходимо построить график зависимости среднего числа достигших анода электронов от напряжения. По графику найти ток насыщения, ток при нулевом напряжении, оценить задерживающее напряжение.

**8. Найти задерживающее напряжение для 4- 5 длин волн.** Длины волн следует брать в интервале 400 - 600 нм с шагом 50 нм. Для каждой длины волны подберите отрицательное задерживающее напряжение без построения вольт - амперной характеристики. Для этого найдите сначала грубо такое напряжение, при котором число частиц мало. Затем, медленно уменьшая отрицательное напряжение, добейтесь того, чтобы частицы перестали достигать анода. Последний опыт провести 5 раз. Результаты занесите в таблицу.

**9. Для каждой длины волны вычислить частоту.** Занесите результаты в таблицу.

**10. Построить график зависимости задерживающего напряжения от частоты.** По данным полученной таблицы постройте график зависимости задерживающего напряжения от частоты. График должен представлять собой прямую линию, которую следует провести так, чтобы экспериментальные точки в среднем были от неё на наименьшем расстоянии.

**11. Определить постоянную Планка.** Из формулы Эйнштейна следует, что тангенс угла наклона графика зависимости задерживающего напряжения от частоты равен отношению постоянной Планка к заряду электрона. Тангенс угла наклона можно найти из графика как отношение катетов. Зная заряд электрона, вычислите постоянную Планка.

Таблица 18.1.

$\lambda =$		$t = 10 \text{ с}$																
№	$U$																	
1	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2
2																		
3																		
4																		
5																		
$N_{\text{CP}}$																		

Таблица 18.2.

$\lambda =$		$t =$																
№	$U_{\text{зад}}$								$U_{\text{нас}}$									
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
$N_{\text{CP}}$																		

Таблица 3

№ $n \setminus n$	$U$	$\lambda, \text{ нм}$				
		400	450	500	550	600
1						
2						
3						
4						
5						
$N_{\text{CP}}$						

**Контрольные вопросы:**

1. Перечислите законы фотоэффекта.
2. Что такое порог фотоэффекта?
3. Записать уравнение фотоэффекта и объяснить его.
4. Почему фотоэлектрические измерения весьма чувствительны к природе и состоянию поверхности фотокатода?
5. Может ли золотая пластинка служить фотосопротивлением?
6. Как при заданной частоте света изменится фототок насыщения с уменьшением освещенности катода?
7. Как из опытов по фотоэффекту определяется постоянная Планка?
8. При замене одного металла другим длина волны, соответствующей красной границе, уменьшается. Что можно сказать о работе выхода этих металлов?

9. Как с помощью уравнения Эйнштейна объяснить I и II законы фотоэффекта?
10. Нарисуйте и объясните вольтамперные характеристики, соответствующие двум различным освещенностям катода при заданной частоте света и двум различным частотам при заданной освещенности.

**ТЕМА:**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.**

*ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21*

**Изучение зависимости сопротивления реальных проводников от их геометрических параметров и удельных сопротивлений материалов.**

**Цель:** Определить удельное сопротивление проводника и сравнить его с табличным значением.

**1. Краткое теоретическое описание**

Немецкий физик Георг Ом (1787-1854) в 1826 году обнаружил, что отношение напряжения  $U$  между концами металлического проводника, являющегося участком электрической цепи, к силе тока  $I$  в цепи есть величина постоянная:

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

Эту величину  $R$  называют электрическим сопротивлением проводника. Электрическое сопротивление измеряется в Омах. Электрическим сопротивлением 1 Ом обладает такой участок цепи, на котором при силе тока 1 А напряжение равно 1 В:

$$1\text{Ом} = \frac{1\text{В}}{1\text{А}}$$

Опыт показывает, что электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади  $S$  поперечного сечения проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad (2)$$

Постоянный для данного вещества параметр  $\rho$  называется удельным электрическим сопротивлением вещества. Удельное сопротивление измеряется в Ом·м. Величина, обратная удельному сопротивлению,

$$\gamma = 1/\rho$$

называется **удельной электрической проводимостью** вещества проводника. Ее единица — сименс на метр (См/м).

Удельное сопротивление металлов зависит от температуры следующим образом:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $t_0=0$  °С,  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов (при не очень низких температурах) близкий к  $1/273$  К<sup>-1</sup>. Следовательно, температурная зависимость сопротивления может быть представлена в виде

$$R = \alpha R_0 T,$$

где  $T$  — термодинамическая температура.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1 Соберите на монтажном столе электрическую схему, показанную на рисунке:

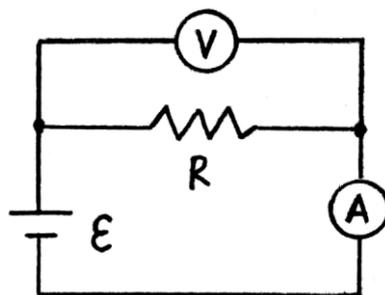


Рис. 1.

2.2 Выберите материал проводника – например, никель, установите значения длины и площади поперечного сечения:

$$L = 100 \text{ м}; \quad S = 0.1 \text{ мм}^2;$$

2.3 Определите экспериментально с помощью мультиметра напряжение на проводнике. Для этого необходимо подключить параллельно проводнику мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения, соблюдая полярность. Запишите показания мультиметра.

2.4 Определите экспериментально с помощью мультиметра силу тока в цепи. Включите мультиметр в режиме измерения постоянного тока последовательно в цепь, соблюдая полярность. Запишите показания мультиметра.

2.5 Рассчитайте сопротивление проводника по формуле (1).

2.6 Определите удельное сопротивление никеля по формуле (2).

2.7 Прodelайте пункты 2.3 – 2.6. изменяя длину, но, не меняя площадь поперечного сечения и материал проводника.

2.8 Результаты измерений занесите в таблицу:

Таблица 21.1.

Начальные условия		Материал		Сечение $S$ , $\text{мм}^2$	
№ опыта	Длина, $м$	Напряжение, $В$	Сила тока, $А$	Сопротивление, $Ом$	Удельное сопротивление, $Ом \cdot м$
1					
2					
3					
4					
5					

2.9 Найдите среднее значение удельного сопротивления и сравните его с табличным значением.

2.10 Измерьте сопротивление проводника непосредственно с помощью омметра. Сравните полученные результаты.

Сформулируйте выводы по проделанной работе.

### **3. Контрольные вопросы.**

3.1 Что называют удельным сопротивлением проводника?

3.2 Как зависит сопротивление проводника от его длины?

3.3 В каких единицах измеряется удельное сопротивление проводника?

3.4 Почему при повышении температуры сопротивление металлического проводника возрастает?

3.5 Что называется температурным коэффициентом сопротивления?

3.6 Какова связь между сопротивлением и проводимостью? Каковы их единицы?

3.7 Какова связь между удельным сопротивлением и удельной проводимостью? Каковы их единицы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22

### Исследование сопротивлений проводников при параллельном и последовательном соединении.

**Цель:** изучить законы протекания тока через последовательно и параллельно соединенные проводники и определить формулы расчета сопротивлений таких участков.

#### 1. Краткое теоретическое описание.

Если  $n$  проводников с сопротивлением  $R_1 - R_n$  последовательно соединены друг с другом (рис. 1), а работа по переносу заряда  $q$  на  $i$ -м проводнике равна  $A$ , то полная работа, совершаемая при переносе  $q$  по всем проводникам

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (1)$$

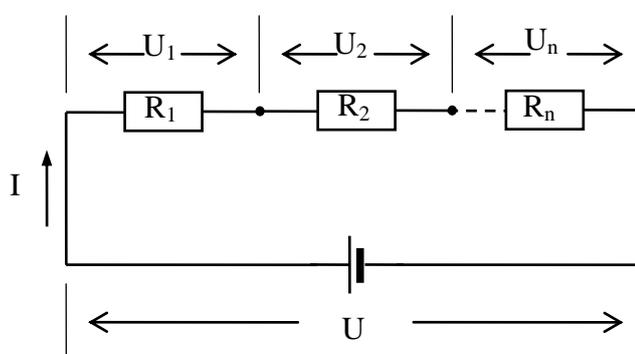


Рис. 1.

Разделив обе части равенства (1) на  $q$ , получим:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (2)$$

Сила тока в последовательно соединенных проводниках одинакова и связана с сопротивлением  $i$ -го проводника и напряжением на нем следующим выражением

$$I = \frac{U_i}{R_i} \quad (3)$$

Подставляя в (2)  $U_i = IR_i$  и  $U = RI$ , получим

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad (4)$$

*-сопротивление последовательно соединенных проводников равно сумме их сопротивлений.*

Если  $n$  проводников соединены параллельно (рис. 2), то напряжение на любом из них одинаково и равно

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (5)$$

Сила тока в  $i$ -м проводнике равна

$$I_i = \frac{U}{R_i} \quad (6)$$

В точках ветвления цепи (узлах) – А и В электрический заряд не накапливается и не исчезает (закон сохранения электрического заряда). Поэтому сила тока, притекающего к точке ветвления, равна сумме сил токов, вытекающих из этой точки:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (7)$$

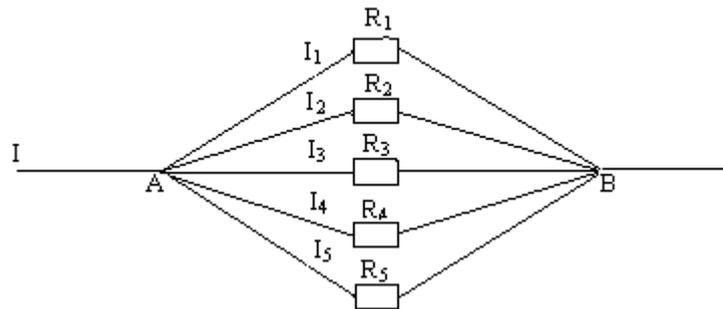


Рис. 2.

Подставляя в (7)  $I = U/R$  и  $I_1, I_2, \dots, I_n$  из (6) получим

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, \quad (8)$$

т.е. *проводимость параллельно соединенных проводников равна сумме их проводимостей.*

Если в электрической цепи проводники соединены и последовательно, и параллельно, то их следует разбить на группы, каждая из которых включает проводники, соединенные определенным способом. Определив сопротивление каждой группы, расчет продолжить по той же схеме до получения окончательного выражения.

## 2. Порядок выполнения работы.

2.1. Соберите на монтажном столе электрическую схему, показанную на рисунке:

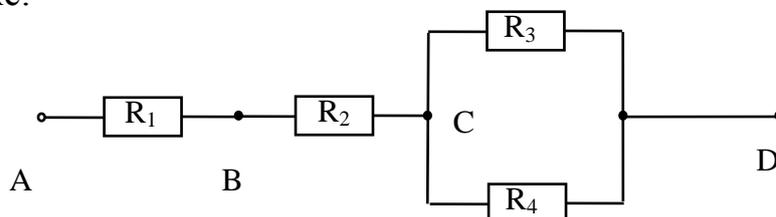


Рис. 3

Выберите номиналы сопротивлений следующими:

$$R_1 = 1 \text{ кОм}; \quad R_2 = 2 \text{ кОм}; \quad R_3 = 3 \text{ кОм}; \quad R_4 = 4 \text{ кОм};$$

2.2. Определите экспериментально с помощью мультиметра (в режиме измерения сопротивлений) сопротивление между точками:

А и С; С и D; В и D; А и D.

**Запишите эти показания.**

2.3. Рассчитайте теоретические значения сопротивлений между указанными точками схемы и сравните их с измеренными.

**Какие выводы можно сделать из этого опыта?**

2.4. Измерьте с помощью мультиметра (в режиме измерения тока) токи, текущие через каждое сопротивление. Запишите показания прибора.

2.4. Проверьте экспериментально, что в последовательной цепи ток одинаков через все сопротивления, а в параллельной цепи разделяется так, что сумма всех токов через параллельно соединенные элементы, равна полному току через весь участок.

2.5. Измерьте с помощью мультиметра (в режиме измерения постоянного напряжения) напряжения на каждом сопротивлении. Запишите показания прибора.

2.6. Проверьте экспериментально, что в последовательной цепи напряжение на всем участке равно сумме напряжений на каждом элементе, а в параллельной цепи, напряжение одно и то же на каждом элементе.

Таблица 22.1

	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$
$R$	$R_{\text{экс}}$	Расчетная формула для $R_{\text{теор}}$		$R_{\text{теор}}$
$R_{AB}$				
$R_{CD}$				
$R_{BD}$				
$R_{AD}$				

Таблица 22.2

$N$ $n/n$	$I_{\text{экон}}$	$U_{\text{экон}}$	Проверка закона Ома	
			$R_{\text{теор}}$	$R_{\text{экс}}$
1				
2				
3				
4				

### 3. Контрольные вопросы.

3.1. Может ли сопротивление участка двух параллельно соединенных проводников быть больше (меньше) любого из них? Объясните ответ.

- 3.2. Какие законы сохранения используются для вывода формул сопротивления параллельного и последовательного соединения проводников?
- 3.3. Зависимость силы тока от сопротивления при параллельном соединении проводников?
- 3.4. Общая сила тока на проводниках, соединенных параллельно и последовательно?
- 3.5. Общее напряжение на проводниках, соединенных параллельно и последовательно?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23

### ЭДС и внутреннее сопротивление источников постоянного тока. Закон Ома для полной цепи.

**Цель:** определить внутреннее сопротивление источника тока и его ЭДС.

#### 1. Краткое теоретическое описание

Электрический ток в проводниках вызывают так называемые источники постоянного тока. Силы, вызывающие перемещение электрических зарядов внутри источника постоянного тока против направления действия сил электростатического поля, называются *сторонними силами*. Отношение работы  $A_{стор.}$ , совершаемой сторонними силами по перемещению заряда  $\Delta q$  вдоль цепи, к значению этого заряда называется *электродвижущей силой*  $\varepsilon$  источника (ЭДС):

$$\varepsilon = \frac{A_{стор.}}{\Delta q} \quad (1)$$

Электродвижущая сила выражается в тех же единицах, что и напряжение или разность потенциалов, т.е. в Вольтах.

Работа – эта мера превращения энергии из одного вида в другой. Следовательно, в источнике сторонняя энергия преобразуется в энергию электрического поля

$$W = \varepsilon \cdot q \quad (2)$$

При движении заряда  $q$  на внешнем участке цепи преобразуется энергия стационарного поля, созданного и поддерживаемого источником:

$$W_1 = U \cdot q, \quad (3)$$

а на внутреннем участке:

$$W_2 = U_{вн.} \cdot q \quad (4)$$

По закону сохранения энергии

$$W = W_1 + W_2 \quad \text{или} \quad \varepsilon \cdot q = U \cdot q + U_{вн.} \cdot q \quad (5)$$

Сократив на  $q$ , получим:

$$\varepsilon = U_{вн.} + U \quad (6)$$

т.е. электродвижущая сила источника равна сумме напряжений на внешнем и внутреннем участке цепи.

При разомкнутой цепи  $U_{вн.} = 0$ , то

$$\varepsilon = U \quad (7)$$

Подставив в равенство (6) выражения для  $U$  и  $U_{вн.}$  по закону Ома для участка цепи

$$U = I \cdot R; \quad U_{вн.} = I \cdot r,$$

получим:

$$\varepsilon = I \cdot R + I \cdot r = I \cdot (R + r) \quad (8)$$

Отсюда

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (9)$$

Таким образом, сила тока в цепи равна отношению электродвижущей силы источника к сумме сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи. Это закон Ома для полной цепи. В формулу (9) входит внутреннее сопротивление  $r$ .

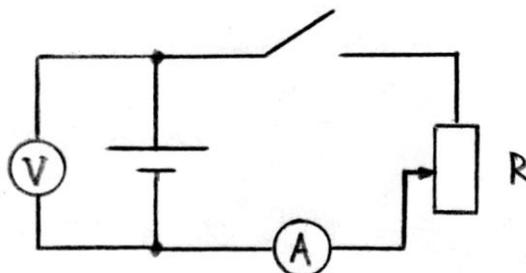


Рис.1.

Пусть известны значения сил токов  $I_1$  и  $I_2$  и падения напряжений на реостате  $U_1$  и  $U_2$  (см. рис.1.). Для ЭДС можно записать:

$$\varepsilon = I_1 \cdot (R_1 + r) \text{ и } \varepsilon = I_2 \cdot (R_2 + r) \quad (10)$$

Приравнивая правые части этих двух равенств, получим

$$I_1 \cdot (R_1 + r) = I_2 \cdot (R_2 + r)$$

или

$$I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot r = I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot r$$

$$I_1 \cdot r - I_2 \cdot r = I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1$$

Т.к.  $I_1 R_1 = U_1$  и  $I_2 R_2 = U_2$ , то можно последнее равенство записать так

$$r \cdot (I_1 - I_2) = U_2 - U_1,$$

откуда

$$r = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \quad (11)$$

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Соберите цепь по схеме, изображенной на рисунке 1. Установите сопротивление реостата 7 Ом, ЭДС батарейки 1,5 В, внутреннее сопротивление батарейки 3 Ом.

2.2. При помощи мультиметра определите напряжение на батарейке при разомкнутом ключе. Это и будет ЭДС батарейки в соответствии с формулой (7).

2.3. Замкните ключ и измерьте силу тока и напряжение на реостате. Запишите показания приборов.

- 2.4. Измените сопротивление реостата и запишите другие значения силы тока и напряжения.
- 2.5. Повторите измерения силы тока и напряжения для 6 различных положений ползунка реостата и запишите полученные значения в таблицу.
- 2.6. Рассчитайте внутреннее сопротивление по формуле (11).
- 2.7. Определите абсолютную и относительную погрешность измерения ЭДС и внутреннего сопротивления батарейки.

Таблица 23.1.

Начальные условия	$R, \text{Ом}$		$\varepsilon, \text{В}$		$r, \text{Ом}$	
	$\varepsilon$	$I$	$U$	$R_{\text{эксп}}$	$R = \frac{U}{I}$	$r$
$N$						
$n/n$						

### 3. Контрольные вопросы

- 3.1. Сформулируйте Закон Ома в дифференциальной форме, для участка цепи, для замкнутой цепи для неоднородного участка цепи?
- 3.2. Чему равно ЭДС источника при разомкнутой цепи?
- 3.3. Чем обусловлено внутреннее сопротивление источника тока?
- 3.4. Чем определяется сила тока короткого замыкания батарейки?
- 3.5. Что такое сторонние силы? Какова их природа?
- 3.6. В чем заключается физический смысл электродвижущей силы, действующей в цепи? напряжения? разности потенциалов?
- 3.7. Почему напряжение является обобщенным понятием разности потенциалов?

**Исследование сложных цепей постоянного электрического тока**

**Цель:** изучить приемы расчета сложных электрических цепей постоянного тока.

**1. Краткое теоретическое описание.**

Для расчета разветвленных цепей, воспользуемся установленными ранее законами электрического тока. Из закона сохранения электрического заряда следует, что для узла

$$\sum_{i=1}^{N_k} I_i = 0, \quad (1)$$

где  $N_k$  – число проводников, подсоединенных к каждому узлу.

На схеме рассчитываемой цепи (рис. 1) направление сил токов задают произвольно. После чего силы токов, притекающих к данному узлу берут со знаком плюс, а силы токов, вытекающих из узла - со знаком минус. Если по завершении расчетов некоторые силы токов оказываются отрицательными величинами, это означает, что их направления были выбраны неправильно, и на схеме их следует заменить на токи, направленные противоположно. Чтобы получить вторую группу уравнений, воспользуемся выражением для напряжения на участке цепи, включающем проводник и источник электродвижущей силы. Для произвольно выбранного  $j$ -го участка цепи равенство запишется в виде:

$$U_j = \varphi_{1j} - \varphi_{2j} + \varepsilon_j \quad (2)$$

По закону Ома  $U_j = R_j I_j$ . Поэтому

$$R_j I_j = \varphi_{1j} - \varphi_{2j} + \varepsilon_j. \quad (3)$$

Рассмотрим любую замкнутую цепь, входящую в состав сложной электрической цепи (рис. 1). Просуммируем для этой цепи левые и правые части выражения (3). Учитывая, что сумма разностей потенциалов для замкнутой цепи равна нулю, получим:

$$\sum_{j=1}^{N_m} R_j I_j = \sum_{j=1}^{N_m} \varepsilon_j \quad (4)$$

Здесь  $N_m$  – полное число проводников, входящих в рассматриваемую замкнутую цепь, а некоторые  $\varepsilon_j$  могут быть равны нулю.

При записи уравнения (4) необходимо строго соблюдать правила выбора знаков перед  $R_j I_j$  и  $\varepsilon_j$ . Например, выбрав направление обхода цепи, происходящим по часовой стрелке, все силы токов, направленные по часовой стрелке следует записывать со знаком плюс, а направленные против часовой стрелки – со знаком минус. Аналогично, электродвижущие силы записывают со знаком плюс, если создаваемый ими ток был бы направлен по часовой стрелке. В противном случае их записывают со знаком минус.

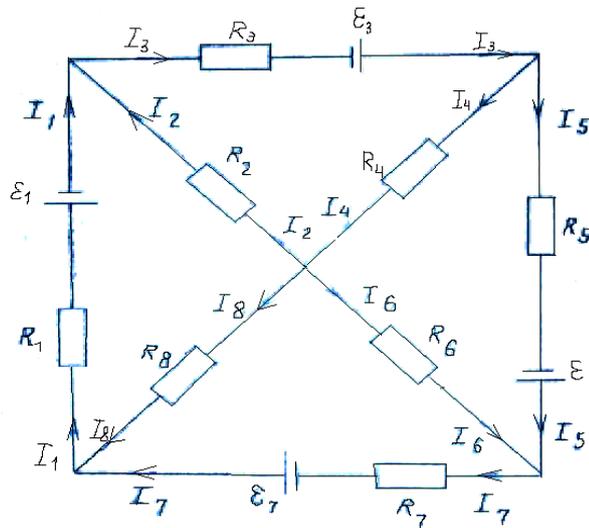


Рис. 1.

Таким образом, метод расчета сложных электрических цепей, основанный на уравнениях (1) и (4) (Метод Кирхгофа), состоит в следующем:

1. На схеме цепи произвольным образом задаются направления электрических токов.
2. Для  $l$  узлов цепи записывается  $l-1$  уравнений (1).
3. Составляются уравнения (4) с учетом сформулированного выше правила знаков. Полное число уравнений (1) и (4) для нахождения  $N$  сил тока, очевидно не должно превышать  $N$ . Если уравнений оказывается больше, следует проверить, не являются ли часть из них следствием других уравнений.
4. Уравнения (1) и (4) решаются совместно.
5. Если при решении системы часть сил токов оказывается отрицательной, это означает, что знаки при них в (1) и (4) а, следовательно, и их направления, были выбраны неправильно. Знаки и направления следует заменить на противоположные.

Приведем запись уравнений (1) и (4) для электрической цепи, схема которой показана на рис. 1. Для пяти узлов следует записать четыре уравнения (1) в виде:

1.  $I_1 - I_3 + I_2 = 0$ ;
2.  $I_3 - I_2 - I_5 = 0$ ;
3.  $I_4 - I_2 - I_6 - I_8 = 0$ ;
4.  $I_5 + I_6 - I_7 = 0$ ;

Сложив левые части всех этих уравнений, легко убедиться, что получается уравнение для пятого узла  $I_1 - I_8 - I_7 = 0$ , т.е. оно является следствием предыдущих уравнений и записывать его не следует.

Уравнение (4) для четырех замкнутых цепей, имеющих вид треугольников с общими вершинами в точке пересечения диагоналей квадрата, запишутся в виде:

$$5. I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_8 R_8 = -\varepsilon_1;$$

$$6. I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = \varepsilon_3;$$

$$7. -I_4 R_4 + I_5 R_5 - I_6 R_6 = \varepsilon_5;$$

$$8. I_6 R_6 + I_7 R_7 - I_8 R_8 = \varepsilon_7.$$

Для нахождения неизвестных восьми значений сил тока мы получили восемь независимых уравнений. Любые добавочные уравнения, как можно проверить, будут следствиями уже записанных уравнений.

Например, сложив по отдельности левые и правые части уравнений 5-8, получим уравнение:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_5 R_5 + I_7 R_7 = -\varepsilon_1 + \varepsilon_3 + \varepsilon_5 + \varepsilon_7.$$

Оно соответствует обходу цепи, которая составлена из сторон квадрата. Очевидно, это уравнение не является независимым и его вносить в систему не следует.

Сложные цепи не всегда удастся представить в виде блоков последовательно и параллельно соединенных сопротивлений. Как же находить сопротивление таких цепей? Иногда эту задачу можно существенно упростить, если схема обладает симметрией.

Рассмотрим в качестве примера такой цепи участок металлической сетки с одинаковыми сопротивлениями  $r$ :

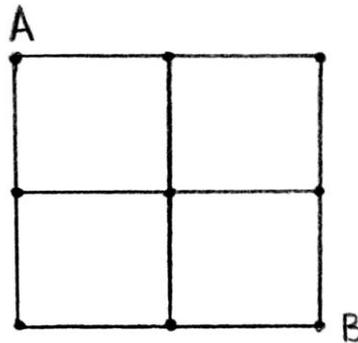


Рис.2.

Каково сопротивление между точками А и В?

Представить эту цепь в виде блоков последовательно и параллельно соединенных сопротивлений не удастся. Как же быть?

Пусть к точкам А и В подключен источник тока.

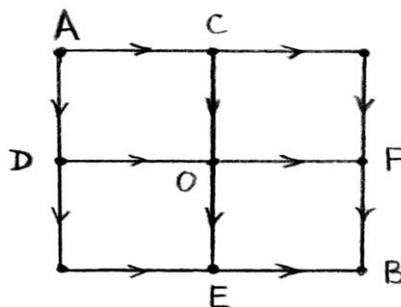


Рис.3.

Посмотрим на токи, которые будут течь через элементы металлической сетки.

Из симметрии ясно, что токи через элементы CO и DO должны быть одинаковы и равны токам, текущим через элементы OF и OE. А раз так, то в точке O цепь можно разорвать, при этом токи через элементы сетки не изменятся:

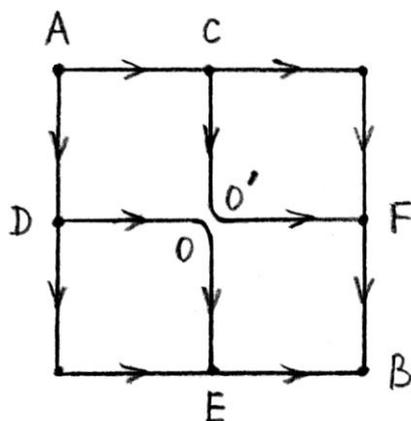


Рис.4.

Последнюю схему уже можно представить в виде блоков последовательно и параллельно соединенных сопротивлений:

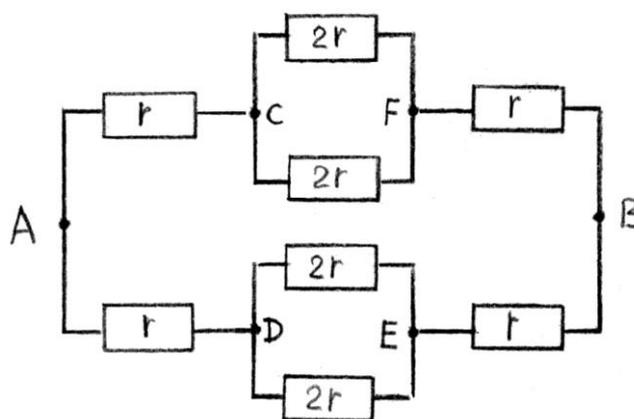


Рис.5.

и определить полное сопротивление  $R_{AB}$  цепи:

$$R_{AB} = \frac{1}{2}(2r + r) = \frac{3}{2}r$$

## 2. Порядок выполнения работы.

- 2.1. Соберите на монтажном столе схему, показанную на рис. 4. Предусмотрите выключатель, соединяющий точки O и O'. Выберите значения сопротивлений одинаковыми и равными 1 кОм.
- 2.2. Измерьте с помощью омметра сопротивление между точками A и B при замкнутом и разомкнутом положении выключателя. Объясните результаты измерений.
- 2.3. Подключите батарейку с ЭДС 1.5 вольт и последовательно с ней амперметр между точками A и B собранной Вами схемы. Измерьте силу тока при разомкнутом и замкнутом ключе. Измерьте напряже-

ние между точками  $O$  и  $O'$  при разомкнутом ключе и подключенной батарее к точкам  $A$  и  $B$ .

Точки схемы, напряжение между которыми равно нулю, можно соединять и такое соединение не изменит токов, текущих по элементам схемы. Иногда такое соединение может существенно упростить схему.

Таблица 24.1.

$N$ $n/n$	$R_{AB}$				$U_{OO'}$
	$R_{AB}$ - при замк	$R_{AB}$ - разомк	$\varepsilon \neq 0$ $R_{AB}$ - при замкн	$\varepsilon \neq 0$ $R_{AB}$ - при разомк	

### 3. Контрольные вопросы.

- 3.1. По каким правилам следует рассчитывать сложные электрические цепи?
- 3.2. Какие свойства схемы могут оказаться полезными при расчете сложных схем?
- 3.3. Между какими точками схемы, изображенной на рис.4, напряжение равно нулю?
- 3.4. Исследуйте аналогичным способом сопротивление между противоположными вершинами проволочного куба? Чему равно сопротивление между этими точками?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25

### Мощность в цепи постоянного тока

**Цель:** изучить законы выделения мощности в цепях постоянного тока и согласования источников тока с нагрузкой.

#### 1. Краткое теоретическое описание.

Любой реальный источник тока имеет внутреннее сопротивление. Поэтому при подключении источника тока к нагрузке, тепло будет выделяться как в нагрузке, так и внутри источника тока (на его внутреннем сопротивлении). На какой нагрузке, подключенной к данному источнику тока, будет выделяться максимальная мощность?

Рассмотрим схему, изображенную на рисунке 1.

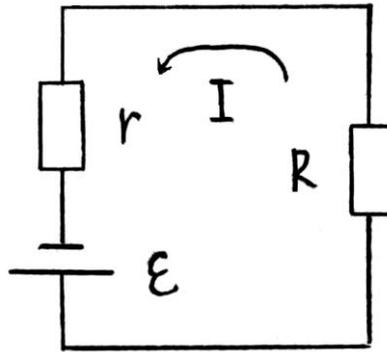


Рис.1.

Сила тока, текущего в контуре, определяется из закона Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  - ЭДС источника тока,  
 $r$  - внутреннее сопротивление источника,  
 $R$  - сопротивление нагрузки.

Напряжение  $U$  на нагрузке  $R$  будет равно:

$$U = R \cdot I = \frac{\varepsilon \cdot R}{R + r}, \quad (2)$$

а мощность  $P$ , выделяемая на сопротивлении  $R$ , будет равна:

$$P = U \cdot I = \frac{\varepsilon^2 \cdot R}{(R + r)^2} \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), выделяемая на нагрузке  $R$  мощность будет мала, если сопротивление  $R$  нагрузки будет мало ( $R \ll r$ ). Мощность также будет мала при очень большом сопротивлении нагрузки ( $R \gg r$ ). Расчет показывает, что максимальная мощность будет выделяться на нагрузке при равенстве внутреннего сопротивления  $r$  и сопротивления нагрузки  $R = r$ . В этом случае:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4R}. \quad (4)$$

## 2. Порядок выполнения работы.

2.1. Соберите на монтажном столе схему, показанную на рис.2.

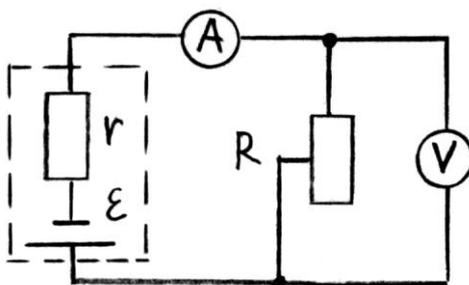


Рис.2.

Выберите значения параметров элементов следующими:

Батарейка:  $\varepsilon = 1.5 \text{ В}$ ;  $r = 10 \text{ Ом}$ ;

Реостат:  $R = 20 \text{ Ом}$

- 2.2. Изменяя положение движка реостата, измеряйте силу тока в цепи и напряжение на реостате (нагрузке).
- 2.3. Занесите полученные данные (сопротивление реостата  $R$ , силу тока  $I$  и напряжение  $U$ ) в таблицу.
- 2.4. Рассчитайте мощность  $P$ , выделяемую на нагрузке для различных значений сопротивления реостата, по формуле  $P = U \cdot I$ .
- 2.5. Постройте график зависимости мощности от сопротивления нагрузки.
- 2.6. Определите из графика значение сопротивления нагрузки, на которой выделяется максимальная мощность.
- 2.7. Сравните полученное Вами значение с теоретическим (4). Сделайте выводы.

Таблица 25.1.

Начальные условия	$\varepsilon, \text{ В}$		$r, \text{ Ом}$		$R, \text{ Ом}$
	$R$	$I$	$U$	$P$	
№					
$n \setminus n$					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

### **3. Контрольные вопросы.**

- 3.1. Сформулируйте закон Джоуля - Ленца.
- 3.2. Как количество теплоты, выделяемое в проводнике, связано с работой источника тока?
- 3.3. Чему равен коэффициент полезного действия нагревательного прибора?
- 3.4. При каком значении внешнего сопротивления ток во внешней цепи максимален?
- 3.5. При каком внешнем сопротивлении максимальной будет полезная мощность?
- 3.6. Как рассчитать максимальные значения этих величин?
- 3.7. Почему при увеличении сопротивления нагрузки напряжение на ней растет?
- 3.8. Объясните, почему выделяемая на нагрузке мощность мала, если сопротивление нагрузки сильно отличается от внутреннего сопротивления источника? Обратите внимание на формулы для силы тока (1) и напряжения (2) на нагрузке.

## Принципы работы плавких предохранителей в электрических цепях

**Цель:** рассчитать предохранители для защиты электрической сети с напряжением 220 В, питающей осветительные и электронагревательные приборы.

### 1. Краткое теоретическое описание.

Электрические цепи всегда рассчитаны на определенную силу тока. Если по той или иной причине сила тока в цепи становится больше допустимой, то провода могут значительно нагреться, а покрывающая их изоляция – воспламениться.

Причиной значительного увеличения силы тока в сети может быть или одновременное включение мощных потребителей тока, например электрических плиток, или *короткое замыкание*. Коротким замыканием называют соединение концов участка цепи проводником, сопротивление которого очень мало по сравнению с сопротивлением участка цепи.

Сопротивление цепи при коротком замыкании незначительно, поэтому в цепи возникает большая сила тока, провода при этом могут сильно накалиться и стать причиной пожара. Чтобы избежать этого, в сеть включают предохранители.

Назначение предохранителей – сразу отключить линию, если сила тока вдруг окажется больше допустимой нормы. Рассмотрим устройство предохранителей, применяемых в квартирной проводке. Главная часть предохранителя – проволока из легкоплавкого металла (например, из свинца), проходящая внутри фарфоровой пробки. Пробка имеет винтовую нарезку и центральный контакт. Нарезка соединена с центральным контактом свинцовой проволокой. Пробку ввинчивают в патрон, находящийся внутри фарфоровой коробки.

Свинцовая проволока представляет, таким образом, часть общей цепи. Толщина свинцовых проволок рассчитана так, что они выдерживают определенную силу тока. Если сила тока превысит допустимое значение, то свинцовая проволока расплавится и цепь окажется разомкнутой.

Предохранители с плавящимся проводником называют *плавким предохранителем*.

Плавкие предохранители должны обеспечивать нормальную работу электроприемников при длительном прохождении по ним номинального тока и немедленно отключать их при перегрузках и коротких замыканиях. Поэтому предохранители выбирают с учетом следующих обстоятельств:

1) номинальный ток плавкой вставки должен удовлетворять требованию

$$I_{вст.} \geq I_p,$$

где  $I_p$  – расчетный ток на защищенном участке цепи;

2) каждый предохранитель должен срабатывать лишь тогда, когда произойдет короткое замыкание на участке цепи, который он защищает, т.е. предохранители должны работать *избирательно* (селективно).

## 2. Порядок выполнения работы.

2.1. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке:

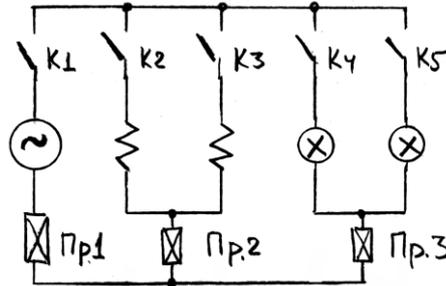


Рис.1.

- 2.2. Выберите напряжение генератора сети равным 220 В, мощности электрических лампочек – 60 и 150 Вт, а рабочее напряжение – 240 В. Выберите мощности электронагревательных приборов – 600 и 1000 Вт, а рабочее напряжение – 240 В.
- 2.3. Определите расчетный ток для каждого электроприемника по формуле  $I = \frac{P}{U}$ . Результаты занесите в таблицу.
- 2.4. Рассчитайте номинальные значения токов плавких предохранителей, защищающих отдельно электроосветительную сеть (Пр.3) и сеть, питающую электронагревательные приборы (Пр.2), а также ток для общего предохранителя (Пр.1), защищающего все электрические приборы.
- 2.5. Замкните ключи  $K_1$  и  $K_4, K_5$ . Убедитесь, что лампы загорелись, а предохранители Пр.1 и Пр.3 не перегорают.
- 2.6. Замкните ключи  $K_1$  и  $K_2, K_3$ . Убедитесь, что нагреватели включились, а предохранители Пр.1 и Пр.2 не перегорают.
- 2.7. Замкните все ключи. Убедитесь, что все электроприборы включились, а все предохранители не перегорают.

Таблица 26.1.

Начальные условия	$U_{Г}, В$	$P_{л1}, Вт$	$P_{л2}, Вт$	$U_{л}, В$	$P_{н1}, Вт$	$P_{н2}, Вт$	$U_{н}, В$
		220	60	150	240	600	1000
№ n\n	$I$						
	$I_{л1}$	$I_{л2}$	$I_{н1}$	$I_{н2}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$

### **3. Контрольные вопросы.**

- 3.1. Какова цель установки предохранителей в электрических цепях?
- 3.2. Как рассчитывается номинальный ток плавкой вставки предохранителя?
- 3.3. Почему правилами техники безопасности запрещается установка так называемых "жучков" - случайно выбранных проводников вместо целых предохранителей?
- 3.4. Какова связь между сопротивлением и проводимостью, удельным сопротивлением и удельной проводимостью? Каковы их единицы? (Дать определения).
- 3.5. В чем заключается явление сверхпроводимости? Каковы его перспективы?  
На чем основано действие термометров сопротивления?
- 3.6. Выведите законы Ома и Джоуля — Ленца в дифференциальной форме.
- 3.7. В чем заключается физический смысл удельной тепловой мощности тока?
- 3.8. Проанализируйте обобщенный закон Ома. Какие частные законы можно из него получить?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 27

### Элементы цепей переменного тока. Емкостное и индуктивное сопротивление, их зависимость от частоты переменного тока и параметров элементов

**Цель:** изучить зависимость емкостного и индуктивного сопротивлений от частоты переменного тока и параметров элементов.

#### 1. Краткое теоретическое описание

В цепи переменного тока кроме резисторов могут использоваться катушки индуктивности и конденсаторы. Для постоянного тока катушка индуктивности имеет только активное сопротивление, которое обычно невелико (если катушка не содержит большое количество витков). Конденсатор же в цепи постоянного тока представляет "разрыв" (очень большое активное сопротивление). Для переменного тока эти элементы обладают специфическим реактивным сопротивлением, которое зависит как от номиналов деталей, так и от частоты переменного тока, протекающего через катушку и конденсатор.

##### 1.1. Катушка в цепи переменного тока.

Рассмотрим, что происходит в цепи, содержащей резистор и катушку индуктивности. Колебания силы тока, протекающего через катушку:

$$i = I_m \cdot \cos(\omega t)$$

вызывают падение напряжения на концах катушки в соответствии с законом самоиндукции и правилом Ленца:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -L\omega I_m \sin(\omega t) = \omega L I_m \cos(\omega t + \pi/2)$$

т.е. колебания напряжения опережают по фазе колебания силы тока на  $\pi/2$ . Произведение  $\omega L I_m$  является амплитудой колебания напряжения:

$$U_L = \omega L I_m$$

Произведение циклической частоты на индуктивность называют *индуктивным сопротивлением* катушки:

$$X_L = \omega L \quad (1)$$

поэтому связь между амплитудами напряжения и тока на катушке совпадает по форме с законом Ома для участка цепи постоянного тока:

$$U_L = X_L I_m \quad (2)$$

Как видно из выражения (1), индуктивное сопротивление не является постоянной величиной для данной катушки, а пропорционально частоте переменного тока через катушку. Поэтому амплитуда колебаний силы тока  $I_m$  в проводнике с индуктивностью  $L$  при постоянной амплитуде  $U_L$  напряжения убывает обратно пропорционально частоте переменного тока:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}$$

## 1.2. Конденсатор в цепи переменного тока.

При изменении напряжения на обкладках конденсатора по гармоническому закону:

$$u_C = U_m \cos(\omega t)$$

заряд  $q$  на его обкладках изменяется также по гармоническому закону:

$$q = Cu_C = CU_m \cos(\omega t).$$

Электрический ток в цепи возникает в результате изменения заряда конденсатора, поэтому колебания силы тока в цепи будут происходить по закону:

$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega CU_m \sin(\omega t) = \omega CU_m \cos(\omega t + \pi/2)$$

Видно, что колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на  $\pi/2$ . Произведение  $\omega CU_m$  является амплитудой колебаний силы тока:

$$I_m = \omega CU_m$$

Аналогично тому, как было сделано с индуктивностью, введем понятие *емкостного сопротивления* конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

Для конденсатора получаем соотношение, аналогичное закону Ома:

$$U_C = X_C I_m \quad (4)$$

Формулы (2) и (4) справедливы и для эффективных значений тока и напряжения.

## 2. Порядок выполнения работы.

- 2.1. Соберите цепь показанную на рисунке 1.
- 2.2. Установите следующие значения параметров:  
Генератор – напряжение (эффективное) 100 В, частота 100 Гц;  
Конденсатор – рабочее напряжение 400 В, емкость 10 мкФ;  
Резистор – рабочая мощность 500 Вт, сопротивление 100 Ом.
- 2.3. Изменяя емкость конденсатора от 5 до 50 мкФ (через 5 мкФ), запишите показания вольтметров (напряжение на конденсаторе и на резисторе).
- 2.4. Рассчитайте эффективное значение токов, текущих в цепи, в зависимости от значения емкости конденсатора (для этого надо напряжение на резисторе разделить на его сопротивление).
- 2.5. Определите значения емкостных сопротивлений конденсатора для соответствующих значений его емкости и сравните их с рассчитанными по формуле (3).
- 2.6. Установите емкость конденсатора 10 мкФ. Изменяя частоту генератора от 20 до 100 Гц через 10 Гц, повторите измерения и расчеты

емкостного сопротивления в зависимости от частоты переменного тока.

2.7. Соберите цепь показанную на рисунке 2.

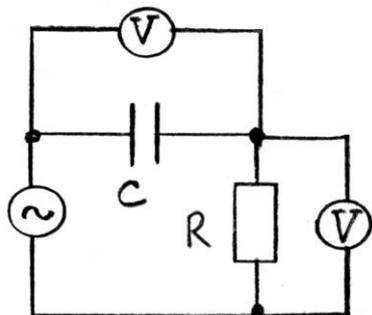


Рис.1.

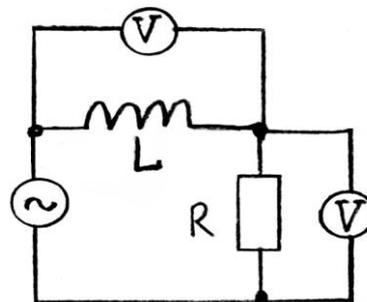


Рис.2.

2.8. Установите следующие значения параметров:

Генератор – напряжение (эффективное) 100 В, частота 100 Гц;

Катушка - индуктивность 50 мГн;

Резистор – рабочая мощность 500 Вт, сопротивление 100 Ом.

2.9. Изменяя индуктивность катушки от 50 до 500 мГн (через 50 мГн), запишите показания вольтметров (напряжение на катушке и на резисторе).

2.10. Рассчитайте эффективное значение токов, текущих в цепи, в зависимости от значения индуктивности катушки (для этого надо напряжение на резисторе разделить на его сопротивление).

2.11. Определите индуктивные сопротивления катушки для соответствующих значений ее индуктивности и сравните их с рассчитанными по формуле (1).

2.12. Установите индуктивность катушки 100 мГн. Изменяя частоту генератора от 20 до 100 Гц через 10 Гц, повторите измерения и расчеты индуктивного сопротивления в зависимости от частоты переменного тока..

2.13. Постройте графики зависимостей индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты переменного тока.

Таблица 27.1.

Начальные условия	$U_2$	$\omega_2$	$U_c$	$C$	$U_p$	$R$
	$C, \text{ мкф}$	$U_c$	$U_p$	$I_{эф}$	$X_{c \text{ эксп}}$	$X_{c \text{ теор}}$
№						
1	5					
2	10					
3	15					
4	20					
5	25					
6	30					
7	35					
8	40					
9	45					
10	50					

Таблица 27.2.

Начальные условия	$C=$									
	$\omega, \text{ Гц}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$X_c \text{ эксп}$										
$X_c \text{ теор}$										

Таблица 27.3.

Начальные условия		$U_\Gamma$	$\omega_\Gamma$	$L, \text{ мГн}$	$U_p$	$R$
		$U_L$	$U_R$	$I_{эфф}$	$R_{L \text{ эксп}}$	$R_{L \text{ теор}}$
№	$L, \text{ мГн}$					
1	50					
2	100					
3	150					
4	200					
5	250					
6	300					
7	350					
8	400					
9	450					
10	500					

Таблица 27.4.

Начальные условия	$L=$									
	$\omega, \text{ Гц}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$X_{L \text{ эксп}}$										
$X_{L \text{ теор}}$										

### **3. Контрольные вопросы.**

- 3.1. Почему емкостное сопротивление уменьшается с увеличением частоты переменного тока, индуктивное сопротивление – увеличивается? Что называется реактивным сопротивлением?
- 3.2. Какова разность фаз между током и напряжением для катушки и конденсатора?
- 3.3. В каких единицах измеряются емкостное и индуктивное сопротивления?
- 3.4. Как записывается аналог закона Ома для максимальных (эффективных) значений тока и напряжения для реактивных элементов – конденсатора и катушки индуктивности?
- 3.5. Как сдвинуты по фазе колебания переменного напряжения и переменного тока текущего через конденсатор? Ответ обосновать также с помощью векторных диаграмм.
- 3.6. Нарисуйте и объясните векторную диаграмму для цепи переменного тока с последовательно включенными резистором, катушкой индуктивности и конденсатором.
- 3.7. Какая связь существует между частотой и периодом гармонических колебаний?
- 3.8. Как будет меняться во времени разность потенциалов на обкладках конденсатора?
- 3.9. Запишите формулу Томсона для определения периода гармонических электромагнитных колебаний в колебательном контуре.
- 3.10. Запишите дифференциальное уравнение гармонических электромагнитных колебаний и его решение для изменения количества электричества на обкладках конденсатора в зависимости от времени. Какому закону подчиняется при этом изменение тока через катушку индуктивности?

**Явление резонанса в цепи переменного тока**

**Цель:** изучение установившихся вынужденных колебаний в цепях переменного тока. Исследование явления резонанса.

**1. Краткое теоретическое описание.**

Рассмотрим электрическую схему на рис.1., в которой последовательно соединенные конденсатор, резистор и катушка индуктивности подключены к генератору переменного напряжения:

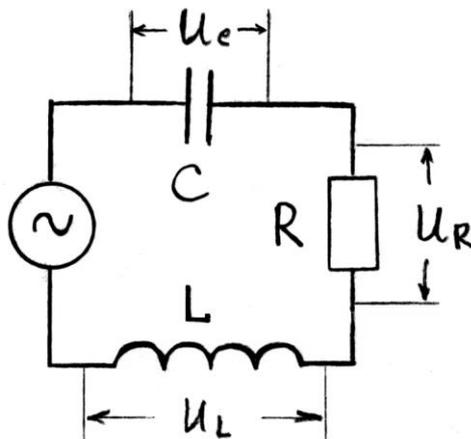


Рис.1.

В этой цепи возникают вынужденные колебания силы тока и напряжения на отдельных её элементах. Амплитуда колебаний силы тока в цепи будет зависеть от частоты  $\omega$  приложенного постоянного напряжения генератора, так как сопротивления реактивных элементов – конденсатора и катушки индуктивности зависят от частоты.

При низкой частоте  $\omega$  переменного тока емкостное сопротивление конденсатора  $X_C = 1/(\omega C)$  будет очень большим, поэтому сила тока в цепи будет мала. В обратном предельном случае большой частоты  $\omega$  переменного тока большим будет индуктивное сопротивление катушки  $X_L = \omega L$ , и сила тока в цепи опять будет мала.

Полное сопротивление  $Z$  цепи, изображенной на рис.1., определяется формулой:

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

Ясно, что максимальная сила тока в цепи будет соответствовать такой частоте  $\omega_0$  приложенного переменного напряжения, при которой индуктивное и ёмкостное сопротивления будут одинаковы:

$$\omega_0 L = 1/(\omega_0 C) \tag{1}$$

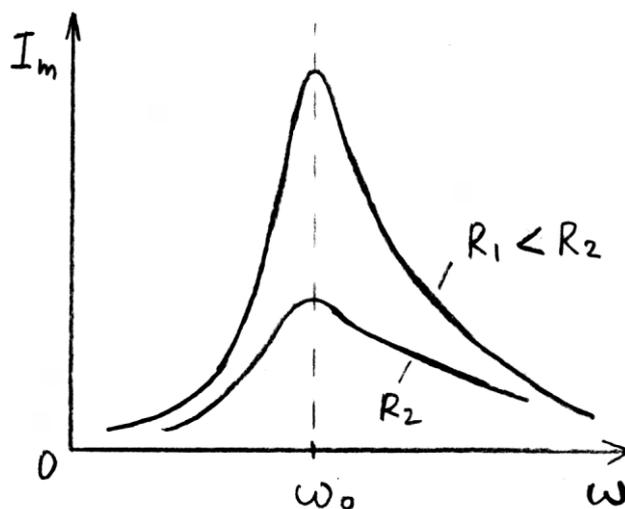
При равенстве реактивных сопротивлений катушки и конденсатора, амплитуды напряжений на этих элементах также будут одинаковыми  $U_C =$

$U_L$ . Колебания напряжения на катушке и конденсаторе противоположны по фазе, поэтому их сумма при выполнении условия (1) будет равна нулю. В результате напряжение  $U_R$  на активном сопротивлении  $R$  будет равно полному напряжению генератора  $U$ , а сила тока в цепи достигает максимального значения  $I_m = U / R$ . Циклическая частота  $\omega$  колебаний силы тока и Э.Д.С. при этом равна

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2)$$

и совпадает с циклической частотой свободных незатухающих электромагнитных колебаний в электрическом контуре.

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока в колебательном контуре при приближении циклической частоты  $\omega$  внешней переменной Э.Д.С. к частоте  $\omega_0$  свободных незатухающих колебаний в контуре называется *резонансом в электрической цепи переменного тока*. Частота  $\omega = \omega_0$  называется *резонансной циклической частотой*. Резонансная циклическая частота не зависит от активного сопротивления  $R$ . График зависимости  $I_m$  от  $\omega$  называется *резонансной кривой*. Резонансные кривые имеют тем более острый максимум, чем меньше активное сопротивление  $R$ :



## 2. Порядок выполнения работы.

2.1. Соберите на монтажном столе схему, показанную на рис. 1., предварительно выбрав значения параметров элементов следующими:

Генератор:  $U_{\text{эф}} = 100 \text{ В}$ ;  $\nu = 10 \text{ Гц}$ ;

Резистор:  $R = 200 \text{ Ом}$ ;  $P = 500 \text{ Вт}$ ;

Конденсатор:  $C = 10 \text{ мкФ}$ ;  $U_{\text{раб}} = 400 \text{ В}$ ;

Катушка:  $L = 1 \text{ Гн}$ .

2.2. Изменяя частоту генератора от 10 Гц до 100 Гц через 10 Гц, с помощью вольтметров измерьте напряжения на катушке, конденсаторе,

резисторе и занесите измеренные значения в таблицу. В наборе конструктора имеется лишь два мультиметра, поэтому придется, изменяя частоту генератора, провести измерения дважды – сначала подключив вольтметры к катушке и конденсатору, а второй раз – подключив вольтметр к резистору.

- 2.3. Постройте графики зависимости напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке в зависимости от частоты генератора.
- 2.4. Рассчитайте по формуле (2) частоту резонанса и сравните полученное значение с экспериментальным.
- 2.5. Измените параметры элементов и повторите измерения и расчеты.
- 2.6. Попытайтесь объяснить экспериментальные графики зависимости напряжений на элементах от частоты переменного тока в цепи.

Таблица 28.1.

Начальные условия	$U_G$	$\nu$	$R$	$P$	$C$	$U_C$	$L$
№	$\omega, \text{Гц}$	$U_L$		$U_C$		$U_R$	
1	10						
2	20						
3	30						
4	40						
5	50						
6	60						
7	70						
8	80						
9	90						
10	100						

### 3. Контрольные вопросы.

- 3.1. В чем состоит явление резонанса?
- 3.2. Чем определяется амплитуда колебаний при резонансе? Как найти резонансную частоту?
- 3.3. Как зависят реактивные сопротивления конденсатора и катушки индуктивности от частоты переменного тока?
- 3.4. Почему сила тока в последовательной цепи с конденсатором, катушкой и резистором имеет максимум при определенной частоте и стремится к нулю при очень малой и очень большой частоте.
- 3.5. Почему при резонансе напряжение на резисторе равно напряжению источника переменного тока?
- 3.6. Назовите характерные признаки резонанса напряжений; резонанса токов? Приведите графики резонанса токов и напряжений.
- 3.7. При каком условии наступает резонанс в последовательной цепи переменного тока?

- 3.8. Чем определяется форма резонансных кривых? Как она связана с добротностью системы?
- 3.9. Чему равно резонансное значение амплитуды силы тока в контуре?
- 3.10. Чему равно максимальное напряжение на обкладках конденсатора в колебательном контуре при резонансе?
- 3.11. Как используется явление резонанса в быту, технике, науке?

## Лабораторная работа № 1.0.1. Измерение размеров малых тел.

Лабораторная работа №1. Измерение размеров малых тел.

Цель работы: научиться определять размеры малых тел с помощью обыкновенной линейки.

Повтори теорию    Предложи способ    Ход работы    Проверь себя    Отчёт

■ Предложите способ определения размеров мелких предметов, позволяющий получить наименьшую погрешность. Используйте только предоставленное оборудование.

**Оборудование**

- линейка
- пробирка
- шарики
- болт с резьбой
- фотография атомов золота
- пшено



**Цель работы:** Определение размеров малых тел с помощью обыкновенной линейки.

**Приборы:** Линейка, шарики из подшипника, винт, горсть пшена, фотография золота в электронном микроскопе.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите способ определения размеров мелких предметов, позволяющий получить наименьшую погрешность.

### Порядок выполнения работы.

**Задание 1.** Измерение диаметра шарика

1. В пробирку положите 10-20 шариков.
2. Измерьте линейкой длину получившегося ряда шариков  $L$ .
3. Вычислите средний диаметр донного шарика  $d$ .
4. Зная цену деления линейки, определите погрешность измерения  $\Delta L$ .
5. Вычислить погрешность приходящий на один шарик  $\Delta d$
6. Результаты измерения и вычислений запишите в таблицу.

**Задание 2.** Измерение шага резьбы винта

1. Измерьте длину всей резьбовой части винта  $L$ .
2. Подсчитайте количество оборотов резьбы  $n$ .
3. Вычислите шаг резьбы винта  $d$ .
4. Результаты измерения запишите в таблицу.
5. Запишите в таблицу погрешность измерения  $\Delta L$ .
6. Вычислить погрешность приходящий на один виток  $\Delta d$ .

**Задание 3.** Измерение шага резьбы винта

1. Горсть пшена подвиньте вплотную к линейке.
2. Измерьте линейкой длину получившегося ряда зерен.  $L$ .
3. Подсчитайте количество зерен лежащих вдоль линейки.
4. Вычислите средний диаметр одного зернышка  $d$ .
5. Результаты измерения запишите в таблицу.
6. Запишите в таблицу погрешность измерения  $\Delta L$ .
7. Вычислить погрешность, приходящее на одно зернышко  $\Delta d$ .

предмет	$n$	$L, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$\Delta L, \text{мм}$	$\Delta d = \Delta L / n, \text{мм}$
шарик					
Шаг резьбы винта					
Зернышко пшена					

**Задание 4.**

Сравните погрешность  $\Delta L$  с погрешностью  $\Delta d$  и сделайте вывод.

**Контрольные вопросы.**

1. Как и во сколько раз изменится погрешность измерения  $\Delta L$ , если использовать линейку с ценой деления 0,5 см вместо миллиметровой?
2. Как и во сколько раз изменится погрешность измерения  $\Delta d$ , если увеличить количество предметов в два раза?
3. Определите, какой диаметр в нанометрах имеет атом золота. Изображение на фотографии, сделанной с помощью электронного микроскопа, увеличено в 20 000 000 раз. 1 см на этой фотографии соответствует 0,5 нанометрам в действительности.

**Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс Физики, М., 2001.
2. Детлаф А. А. Яворский Б. М. Курс Физики, М., 2000.

## Лабораторная работа № 1.0.5. Измерение выталкивающей силы

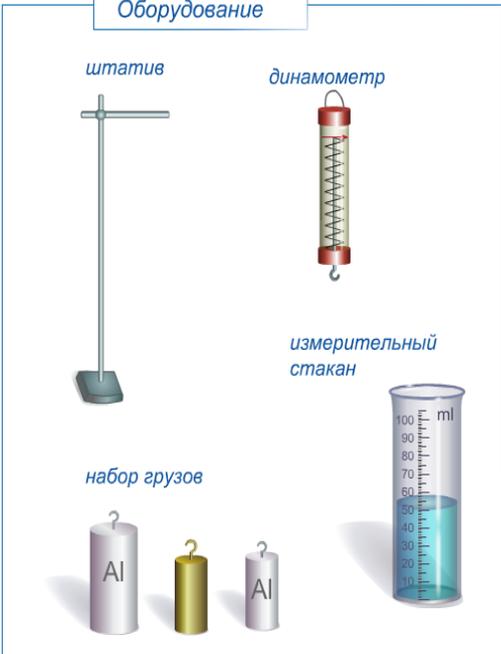
Лабораторная работа №5. Измерение выталкивающей силы.

Цель работы: определить выталкивающую силу, действующую на тело, погруженное в воду.

Повтори теорию   Предложи способ   Ход работы   Проверь себя   Отчёт

■ Предложите способ измерения выталкивающей силы. Используйте только предоставленное оборудование

Оборудование



The diagram shows the following equipment: a stand (штатив), a dynamometer (динамометр), a measuring cylinder (измерительный стакан) with a scale from 0 to 100 ml, and a set of weights (набор грузов) including two aluminum (Al) cylinders and one brass weight.

**Цель работы:** Определение выталкивающей силы, действующей на тело, погруженное в воду.

**Приборы:** Штатив, динамометр, измерительный стакан, набор грузов.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите способ измерения выталкивающей силы.

### Порядок выполнения работы.

**Задание 1.** Измерения.

1. Погрузите маленький алюминиевый цилиндр в измерительный стакан и определите его объем  $V$
2. Измерьте вес этого цилиндра в воздухе  $P_0$
3. Измерьте вес цилиндра, полностью погруженного в воду  $P_1$
4. Повторите измерения для двух других тел.
5. Результаты измерений занесите в таблицу.

**Задание 2.** Вычисления.

1. Для каждого тела вычислите выталкивающую (Архимедову) силу  $F_A$  как разницу между весом тела в воздухе  $P_0$  и в воде  $P_1$
2. Зная объем вытесненной воды вычислите ее вес для каждого из трех цилиндров  $P_{\text{воды}} = V \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot g$ , где  $\rho_{\text{воды}} = 1 \text{ г/см}^3$ , а ускорение свободного падения можем принять равным 10.
3. Результаты вычислений занесите в таблицу.

Тело №	V, мл	$P_0$ , Н	$P_1$ , Н	$F_A$ , Н	$P_{\text{воды}}$ , Н
1					
2					
3					

### Задание 3.

Сравните для каждого тела вычисленные значения  $F_A$  и  $P_{\text{воды}}$  и попробуйте сформулировать закон Архимеда, т.е. чему равна выталкивающая сила, действующая на тело, погруженное в жидкость.

### Задание 4.

1. Сравните значения Архимедовой силы, вычисленные для каждого из цилиндров.
2. Сделайте вывод о зависимости этой силы от объема и веса полностью погружаемых в жидкость тел.

### Контрольные вопросы.

1. Даны два тела одинакового объема. При этом у первого тела плотность в 2 раза больше. Как и во сколько раз изменится выталкивающая сила, действующая на первое тело по сравнению с выталкивающей силой, действующей на второе?
  - а) не изменится
  - б) увеличится в \_\_\_ раз
  - в) уменьшится в \_\_\_ раз
2. Объем первого тела в два раза больше объема второго тела. При этом плотность первого в 3 раза больше. Как и во сколько раз изменится выталкивающая сила, действующая на первое тело, по сравнению с выталкивающей силой, действующей на второе?
  - а) не изменится
  - б) увеличится в \_\_\_ раз
  - в) уменьшится в \_\_\_ раз

## Лабораторная работа № 1.0.6. Выяснение условий равновесия рычага

Лабораторная работа №6. Выяснение условий равновесия рычага.

Цель работы: провести экспериментальную проверку правила моментов сил.

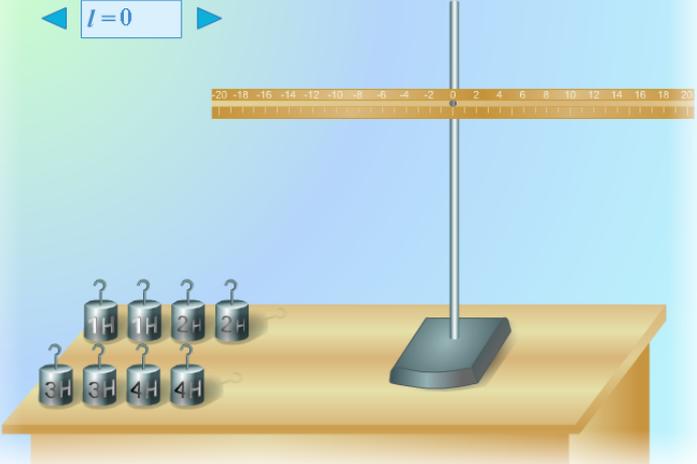
Повтори теорию Предложи способ Ход работы Проверь себя Отчёт

1

Если закрепить груз весом 3Н в точке, удаленной на 12см от точки опоры, то на каком расстоянии нужно закрепить груз весом 4Н, чтобы уравновесить рычаг?

Ответ:  см

$M_{\text{сум}} = 0$   
 $I = 0$



**Цель работы:** Экспериментальная проверка правила моментов сил.

**Приборы:** Рычаг на штативе, набор грузов, линейка.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите способ проверки правила моментов сил.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание 1.

1. Подвесьте груз весом 2Н к левому плечу рычага на расстоянии  $l_1=12$  см от оси вращения.
2. Расположите на правом плече рычага груз весом 3Н так, чтобы рычаг находился в положении равновесия. Измерьте плечо  $l_2$
3. Заполните первую строку в таблице.

#### Задание 2.

1. Подвесьте груз весом 2Н к плечу рычага на расстоянии  $l_1=12$ см от оси вращения.
2. Расположите на правом плече рычага груз весом 3Н так, чтобы рычаг находился в положении равновесия. Измерьте плечо  $l_2$
3. Заполните вторую строку в таблице.

$l_1, \text{ м}$	$F_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$F_2, \text{ м}$	$M_1, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M_2, \text{ Н}\cdot\text{м}$

### Задание 3.

Сравните полученные результаты и напишите свой вывод.

#### Контрольные вопросы.

1. Если закрепить груз весом 3Н в точке, удаленной на 12 см от точки опоры, то на каком расстоянии (см) нужно закрепить груз весом 4Н, чтобы уравновесить рычаг?
2. Если закрепить на левом плече рычага груз весом 3Н в точке, удаленной на 8 см от точки опоры и груз весом 2Н в точке, удаленной на 6 см от точки опоры, то на каком расстоянии (см) надо закрепить груз весом 6Н, чтобы уравновесить рычаг?
3. Если закрепить на левом плече рычага груз весом 3Н в точке, удаленной на 8 см от точки опоры, а на правом плече закрепить груз весом 2Н в точке, удаленной на 6 см от точки опоры, то на каком расстоянии (см) надо закрепить груз весом 6Н, чтобы уравновесить рычаг?

## Лабораторная работа № 1.0.7. Изучение равноускоренного движения

Лабораторная работа №7. Изучение равноускоренного движения.

Цель работы: ознакомиться с основными закономерностями равноускоренного движения.

Повтори теорию    Предложи способ    Ход работы    Проверь себя    Отчёт

■ Предложите способ исследования вопроса: является ли движение шара по желобу равноускоренным. Используйте только предоставленное оборудование.

**Оборудование:**  
Желоб длиной один метр, угол наклона которого можно изменять меняя, высоту крепления в штативе



Набор шаров разного размера    часы

линейка

**Цель работы:** Знакомство с основными закономерностями равноускоренного движения.

**Приборы:** Желоб известной длины (1 метр), угол наклона которого можно изменять и измерять. Набор шаров разного размера и материала.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите способ исследования вопроса: является ли движение шара по желобу равноускоренным. Используйте только предоставленное оборудование.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание 1.

1. Закрепите желоб в штативе на высоте  $h=10\text{см}$ .

2. Установите стопор на расстоянии  $x=10\text{см}$ . Запустите шарик и измерьте время его движения  $t$ .
3. Установите стопор в новое положение и измерьте время движения шарика.
4. Повторите измерения несколько раз для различных положений стопора. Результаты занесите в таблицу.
5. Вычислите ускорение шарика по формуле равноускоренного движения  $a=2x/t^2$ . Если движение равноускоренное, то величина ускорения не должна меняться от опыта к опыту.
6. Измените наклон желоба и повторите упражнение.

h, м	x, м	t, с	a, м/с <sup>2</sup>

### Задание 2.

1. Закрепите желоб в штативе на высоте  $h=10\text{см}$ .
2. Установите стопор на расстоянии  $x=90\text{см}$ .
3. Запустите шарик и измерьте время его движения  $t$ .
4. Повторите опыт с другими шариками, не меняя наклона желоба и положения стопора.
5. Вычислите ускорение шарика по формуле равноускоренного движения  $a=2x/t^2$ . Результаты занести в таблицу.

№	h, м	x, м	t, с	a, м/с <sup>2</sup>
1				
2				
3				
4				

### Задание 3.

Сравните полученные в ходе эксперимента значения ускорения и запишите свой вывод.

### Контрольные вопросы.

1. Как и во сколько раз изменится ускорение шарика, если синус угла наклона желоба а) увеличить вдвое, б) уменьшить втрое?
  - а) не изменится
  - увеличится в \_\_\_ раз

- уменьшится в \_\_\_ раз  
 б) не изменится  
 увеличится в \_\_\_ раз  
 уменьшится в \_\_\_ раз
- Угол наклона желоба равен 6 градусам. Его уменьшили в 2 раза. Во сколько раз изменилось ускорение? Попробуйте объяснить почему?
  - Угол наклона желоба равен 5 градусам. Его увеличили в 9 раз. Во сколько раз изменилось ускорение? Попробуйте объяснить почему?

### Лабораторная работа № 1.0.8. Изучение колебаний нитяного маятника

1

Повтори теорию / Предложи способ / Ход работы / Проверь себя / Отчёт

Цель работы: установить зависимость периода колебаний нитяного маятника от его длины.

№	L, м	t, с	n	T, с	ν, 1/с (Гц)
1					
2					
3					

1. Установите длину нити около 20 – 30 см.

2. Отклоните шарик на небольшой угол от положения равновесия и отпустите.

3. Измерьте время, за которое маятник сделает n=30 полных колебаний.

4. Вычислите период и частоту колебаний.

5. Результаты измерений занесите в первую строку таблицы.

**Цель работы:** Исследование зависимости периода колебаний нитяного маятника от его длины.

**Приборы:** Шарик на нити, штатив с кольцом, часы или секундомер, измерительная лента.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел,

чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите способ проверки зависимости периода колебаний маятника от его длины. Используйте только предоставленное оборудование.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание 1.

1. Установите длину нити около 20-30 см.
2. Отклоните шарик на небольшой угол от положения равновесия и отпустите.
3. Измерьте время, за которое маятник сделает  $n=30$  полных колебаний.
4. Вычислите период и частоту колебаний.
5. Результаты измерений занесите в первую строку таблицы.

#### Задание 2.

1. Повторите опыт, уменьшив длину нити в 4 раза.
2. Заполните вторую строку в таблице.
3. Повторите опыт, увеличив длину нити до 30 см.
4. Заполните третью строку в таблице.

№	L, м	t, с	n	T, с	$\nu$ , 1/с (Гц)
1					
2					
3					

#### Задание 3.

Сравните полученные результаты и напишите свой вывод.

### Контрольные вопросы.

1. Какова должна быть длина маятника, если период его колебаний равен 0.5 с?
2. Какова должна быть длина маятника, если частота его колебаний равна 1 Гц?
3. Во сколько раз и как изменится период колебаний маятника, если его длина увеличится в 9 раз?
  - а) не изменится
  - б) увеличится в \_\_\_ раз
  - в) уменьшится в \_\_\_ раз
4. Во сколько раз и как изменится частота колебаний маятника, если его длина увеличится в 4 раза?
  - а) не изменится
  - б) увеличится в \_\_\_ раз
  - в) уменьшится в \_\_\_ раз

## Лабораторная работа № 1.0.9. Изучение явления теплообмена.

**Лабораторная работа №9. Изучение явления теплообмена.**

Цель работы: измерить удельную теплоемкость металлов и проверить уравнение теплового баланса.

Повтори теорию / 
 Предложи способ / 
 Ход работы / 
 Проверь себя / 
 Отчёт

**1**

1. Налейте в калориметр столько холодной воды, чтобы в нее можно было полностью погрузить цилиндр.
2. Измерьте температуру воды  $T_{\text{воды}}$  в калориметре и ее объем  $V_{\text{воды}}$ . Запишите эти значения в таблицу.
3. Налейте в стакан горячей воды и погрузите в нее стальной цилиндр массой 300 г.
4. Измерьте температуру горячей воды (цилиндра)  $T_{\text{тепла}}$ . Запишите ее в таблицу.
5. Перенесите цилиндр в калориметр и закройте крышку.
6. Дождитесь, пока температура в калориметре не перестанет меняться. Запишите установившуюся температуру  $T_{\text{кон.}}$  в таблицу.
7. Зная из таблицы удельную теплоемкость воды, вычислите количество теплоты, полученное водой, по известной формуле:  
 $Q_{\text{пол.}} = V \cdot \rho \cdot c (T_{\text{кон.}} - T_{\text{воды}})$ .
8. Зная из таблицы удельную теплоемкость стали, вычислите количество теплоты, отданное телом, по известной формуле:  
 $|Q_{\text{отд.}}| = m \cdot c |T_{\text{кон.}} - T_{\text{тепла}}|$ .
9. Повторите измерения для алюминиевого цилиндра массой 100 г.

**2**

**3**

№	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	$V_{\text{воды}}, \text{мл}$	$T_{\text{тепла}}, ^\circ\text{C}$	$m_{\text{тепла}}, \text{г}$	$T_{\text{кон.}}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{отд.}}, \text{Дж}$	$Q_{\text{пол.}}, \text{Дж}$
1				300			
				100			
2				300			
				100			

**Цель работы:** Определение удельной теплоемкости металлов и проверка уравнения теплового баланса.

**Приборы:** Грузы известной массы, калориметр, градусник, стаканы с холодной и горячей водой.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите свой способ проверки уравнения теплового баланса. Используйте только предоставленное оборудование.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание 1.

1. Налейте в калориметр столько холодной воды, чтобы в нее полностью можно было погрузить цилиндр.
2. Измерьте температуру воды  $T_{\text{воды}}$  в калориметре и ее объем  $V$  воды. Запишите эти значения в таблицу.

3. Налейте в стакан горячей воды и погрузите в нее стальной цилиндр массой 300 г.
4. Измерьте температуру горячей воды (цилиндра)  $T_{\text{тела}}$ . Запишите ее в таблицу.
5. Перенесите цилиндр в калориметр и закройте крышку.
6. Дождитесь, пока температура в калориметре не перестанет меняться. Запишите установившуюся температуру  $T_{\text{кон.}}$  в таблицу.
7. Зная из таблицы уд. теплоемкость воды, вычислить количество теплоты, полученное водой по известной формуле  $Q_{\text{пол.}} = V \cdot \rho \cdot c (T_{\text{кон.}} - T_{\text{воды}})$ .
8. Зная из таблицы уд. теплоемкость стали, вычислить количество теплоты, отданное телом по известной формуле  $Q_{\text{отд.}} = m \cdot c (T_{\text{кон.}} - T_{\text{тела}})$ .
9. Повторите измерения для алюминиевого цилиндра массой 100 г.

### Задание 2.

1. Налейте в калориметр горячей воды. Закройте калориметр крышкой.
2. Измерьте температуру воды  $T_{\text{воды}}$  в калориметре и ее объем  $V_{\text{воды}}$ . Запишите эти значения в таблицу.
3. Налейте в стакан холодной воды и погрузите в нее стальной цилиндр массой 300 г.
4. Измерьте температуру холодной воды (цилиндра)  $T_{\text{тела}}$ . Запишите ее в таблицу.
5. Перенесите цилиндр в калориметр и закройте крышку.
6. Дождитесь, пока температура в калориметре не перестанет меняться. Запишите установившуюся температуру  $T_{\text{кон.}}$  в таблицу.
7. Зная из таблицы удельную теплоемкость воды, вычислить количество теплоты, полученное водой по известной формуле  $Q_{\text{отд.}} = V_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot c_{\text{воды}} (T_{\text{кон.}} - T_{\text{воды}})$ .
8. Зная из таблицы уд. теплоемкость стали, вычислить количество теплоты, отданное телом по известной формуле  $Q_{\text{пол.}} = m_{\text{тела}} \cdot c_{\text{стали}} (T_{\text{кон.}} - T_{\text{тела}})$ .
9. Повторите измерения для алюминиевого цилиндра массой 100 г.

№	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	$V_{\text{воды}}, \text{мл}$	$T_{\text{тела}}, ^\circ\text{C}$	$m_{\text{тела}}, \text{г}$	$T_{\text{кон.}}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{отд.}}, \text{Дж}$	$Q_{\text{пол.}}, \text{Дж}$
1				300			
				100			
2				300			
				100			

### Задание 3.

Сравните значения  $Q_{\text{пол}}$  и  $Q_{\text{отд}}$  для каждого измерения и сделайте вывод.

### Контрольные вопросы.

1. Убедившись в справедливости уравнения теплового баланса  $Q_{\text{пол}}=Q_{\text{отд}}$ , мы можем померить удельную теплоемкость тела из неизвестного нам вещества. Подставляя в уравнение измеренные значения, получаем:

$c_{\text{воды}} \cdot m_{\text{воды}} \cdot |T_{\text{кон}} - T_{\text{воды}}| = c_{\text{тела}} \cdot m_{\text{тела}} \cdot |T_{\text{кон}} - T_{\text{тела}}|$ , откуда

$$c_{\text{тела}} = c_{\text{воды}} \cdot m_{\text{воды}} \cdot |T_{\text{кон}} - T_{\text{воды}}| / m_{\text{тела}} \cdot |T_{\text{кон}} - T_{\text{тела}}|$$

Измерьте удельную теплоемкость оставшихся двух цилиндров. Измерения проводятся также как и в ходе основной работы. Для более точного измерения следите, чтобы разница температур в калориметре и в стакане была значительной. Результаты занесите в первые две строчки таблицы. Сверяясь с табличными данными, сделайте предположение о материале цилиндров.

2. Измерьте удельную теплоемкость медной 5-ти граммовой монетки. Для определения теплоемкости монетки в калориметр нужно залить горячую воду, а затем несколько раз перенести монетку из сосуда с холодной водой в калориметр и обратно. Количество теплоты, перенесенное монеткой за один раз, слишком мало, чтобы заметить изменение температуры воды в калориметре. Формула в данном случае будет выглядеть так:

$$C_{\text{тела}} = C_{\text{воды}} \cdot M_{\text{воды}} \cdot |T_{\text{кон}} - T_{\text{воды}}| : n \cdot M_{\text{тела}} \cdot |T_{\text{кон}} - T_{\text{тела}}|$$

Результаты занесите в третью строчку таблицы. Сверяясь с табличными данными, сделайте предположение о материале монетки.

## Лабораторная работа № 1.10. Изучение закона Ома.

☰ ☒

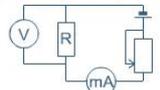
### Лабораторная работа №10. Изучение закона Ома.

Цель работы: проверить закона Ома, изучить основные принципы работы цепи постоянного тока.

Повтори теорию
Предложи способ
Ход работы
Проверь себя
Отчёт

1

1. Соберите цепь, как показано на рисунке, используя сопротивление 50 Ом.



2. Поставьте реостат в среднее положение.  
 3. Измерьте силу тока и напряжение на сопротивлении. Занесите данные в таблицу.  
 4. Вычислите величину сопротивления. При расчетах учитывайте, что силу тока мы мерили в миллиамперах, а в расчетную формулу нужно подставлять значения в амперах.  
 5. Измените положение реостата. Снова измерьте силу тока и напряжение.  
 6. Повторите п.3. несколько раз.  
 7. Поменяйте сопротивление 50 Ом на 100 Ом и повторите измерения.

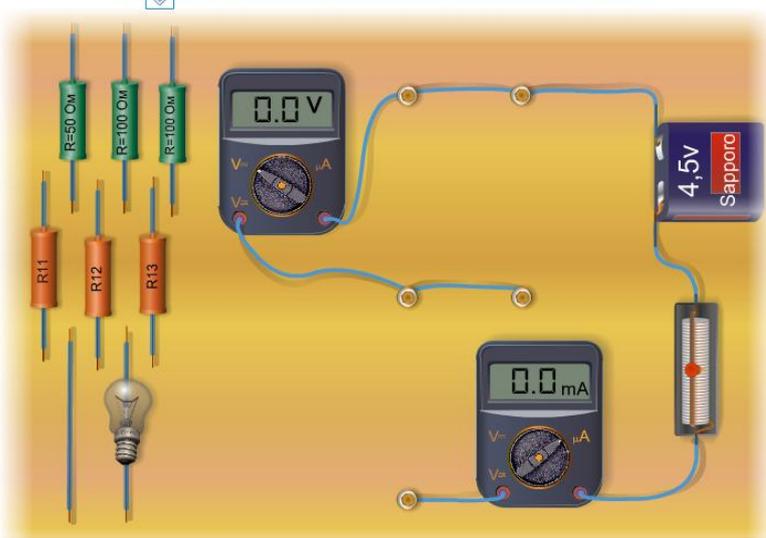
2

3

4

5

	№	U, В	I, А	R <sub>эсп.</sub> = $\frac{U}{I}$ , Ом	R <sub>зад.</sub> , Ом
R <sub>1</sub>	1				50
	2				
	3				



**Цель работы:** Проверка закона Ома, изучение основных принципов работы цепи постоянного тока.

**Приборы:** Амперметр (100 мА), вольтметр (5В), источник тока на 4,5 В, реостат, 3 известных сопротивления, 3 неизвестных сопротивления, лампочка, провода.

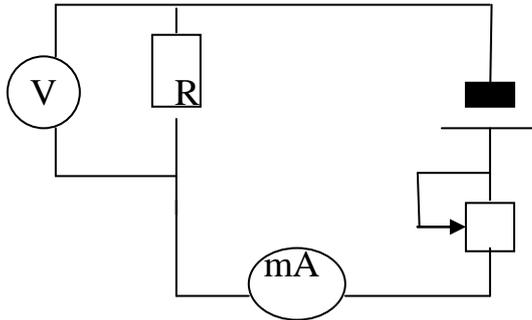
**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите способ проверки закона Ома. Используйте только предоставленное оборудование.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание 1.

1. Соберите цепь, как показано на рисунке, используя сопротивление 50 Ом.
2. Поставьте реостат в среднее положение.
3. Измерьте силу тока и напряжение на сопротивлении. Занесите данные в таблицу.
4. Вычислите величину сопротивления. При расчетах учитывайте, что силу тока мы мерили в миллиамперах, а в расчетную формулу нужно подставить значения в амперах.

5. Измените положение реостата. Снова измерьте силу тока и напряжение.
6. Повторите п.3 несколько раз.
7. Поменяйте сопротивление 50 Ом на 100 Ом и повторите измерения.



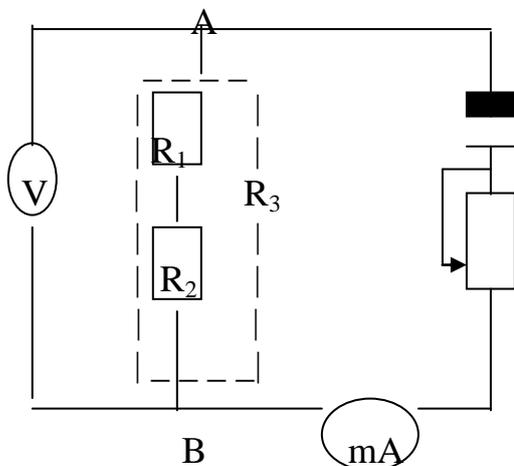
	№	U, В	I, mA	$R=U/I$ , Ом	$R_{зад.}$ , Ом
$R_1$	1				50
	2				
	3				
$R_2$	1				100
	2				
	3				

### Задание 2.

Сравните значения сопротивлений, полученных при различных напряжениях, сделайте вывод.

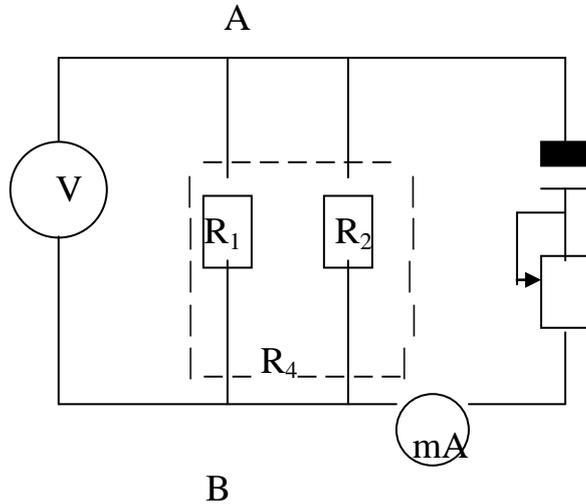
### Задание 3.

1. Соберите цепь как показано на рисунке, используя сопротивления  $R_1=50$  Ом и  $R_2=100$  Ом.
2. Измерьте силу тока через амперметр и напряжение между точками А и В.
3. Вычислите величину эквивалентного сопротивления  $R_3$ .



**Задание 4.**

1. Соберите цепь как показано на рисунке, используя сопротивления  $R_1=50\text{ Ом}$  и  $R_2=100\text{ Ом}$ .
2. Измерьте силу тока через амперметр и напряжение между точками А и В.
3. Вычислите величину эквивалентного сопротивления  $R_4$ .



**Задание 5.**

Сделайте вывод о том, как меняются значения сопротивлений при последовательном и при параллельном соединении.

**Контрольные вопросы.**

1. Измерьте сопротивления  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ . Для удобства подсчета используйте таблицу. Запишите полученные результаты в поля.

$$R_{11} = \underline{\quad} \text{ Ом}$$

$$R_{12} = \underline{\quad} \text{ Ом}$$

$$R_{13} = \underline{\quad} \text{ Ом}$$

	№	U, В	I, mA	$R=U/I$ , Ом	$R_{cp.}$ , Ом
$R_{11}$	1				
	2				
	3				
$R_{12}$	1				
	2				
	3				
$R_{13}$	1				
	2				
	3				
$R_{лампы}$	1				
	2				
	3				

2. Каким будет эквивалентное сопротивление, если последовательно соединить два резистора 100 Ом и 100 Ом?  
 $R_{\text{э}} = \underline{\quad} \text{ Ом}$
3. Каким будет эквивалентное сопротивление, если эти резисторы по 100 Ом соединить параллельно?  
 $R_{\text{э}} = \underline{\quad} \text{ Ом}$
4. Возьмите вместо сопротивления электрическую лампочку. Исследуйте зависимость силы тока от напряжения. Результаты исследований запишите в последний блок таблицы. Будет ли эта зависимость пропорциональной? Дайте объяснение этой зависимости.

## Лабораторная работа № 1.11. Изучение свойств собирающей линзы.

Лабораторная работа №11. Изучение свойств собирающей линзы.

Цель работы: научиться пользоваться собирающей линзой, проверить формулу тонкой линзы.

Повтори теорию
Предложи способ
Ход работы
Проверь себя
Отчёт

**1**

1. Возьмите линзу с фокусным расстоянием 5 см.
2. Установите линзу на расстоянии 10 см от экрана.
3. Установите источник света на расстоянии 5 см от линзы.
4. Передвигайте источник света, пока на экране не установится четкое изображение.
5. Занесите данные в таблицу.

**2**

**3**

$d, м$	$d_l, м$	$\frac{1}{d}, \frac{1}{м}$	$\frac{1}{d_l}, \frac{1}{м}$	$\frac{1}{f}, \frac{1}{м}$	$f_{\text{экспер}}, м$	$f, м$

**Цель работы:** Использование собирающей линзы, проверка формулы тонкой линзы.

**Приборы:** Экран с миллиметровой сеткой, набор линз с известным фокусным расстоянием: 3см, 5см, 7см, 12см, 15см, одна с неизвестным фокусным расстоянием, точечный источник света, линейка.

**Задание для самостоятельной работы:** Изучите в учебнике, рекомендованном согласно списку литературы, соответствующий раздел, чтобы иметь представление о том, что вы собираетесь делать. Предложите метод проверки формулы тонкой линзы. Используйте только предоставленное оборудование.

### Порядок выполнения работы.

#### Задание №1

1. Возьмите линзу с фокусным расстоянием 10 см.
2. Установите линзу на расстоянии 20 см от экрана.
3. Установите источник света на расстоянии 10 см от линзы.
4. Передвигайте источник света, пока на экране не установится четкое изображение.
5. Занесите данные в таблицу

#### Задание №2

1. Возьмите линзу с фокусным расстоянием 5 см.
2. Установите линзу на расстоянии 50 см от экрана.
3. Установите источник света на расстоянии 25 см от линзы.
4. Передвигайте источник света, пока на экране не установится четкое изображение.
5. Занесите данные в таблицу

d, м	d <sub>1</sub> , м	1/d, 1/м	1/d <sub>1</sub> , 1/м	1/f, 1/м	f <sub>экспер</sub> , м	f, м

#### Задание №3.

Сравните полученные в ходе эксперимента значения фокуса и запишите свой вывод.

#### Контрольные вопросы.

1. Чему равно фокусное расстояние неподписанной (последней) линзы? Для удобства подсчета заполните таблицу (сверху).
2. Источник света расположен на расстоянии 20 см от линзы, фокусное расстояние линзы 7 см. На каком расстоянии (см) от линзы нужно расположить экран, чтобы изображение было в фокусе?
3. Источник света можно отодвинуть от экрана не более чем на 50 см. Какое максимальное фокусное расстояние можно измерить указанным выше способом?

### 3. СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### 3.1. Электрический ток и электродвижущая сила.

*Электрическим током* называется упорядоченное движение электрических зарядов. За направление электрического тока принято направление движения *положительных* зарядов. Электрический ток возникает в проводниках под действием электрического поля.

Отношение заряда  $\Delta q$ , проходящего через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$ , к этому интервалу времени называется *силой тока*  $I$ :

$$I = \Delta q / \Delta t.$$

Сила тока измеряется в Амперах. Если сила тока не изменяется со временем, электрический ток называют *постоянным током*.

Электрический ток в проводниках вызывают так называемые *источники постоянного тока*. Силы, вызывающие перемещение электрических зарядов внутри источника постоянного тока против направления действия сил электростатического поля, называются *сторонними силами*. Сторонние силы в гальваническом элементе или аккумуляторе возникают в результате электрохимических процессов, происходящих на границе электрод - электролит. В динамо-машине постоянного тока *сторонней силой* является сила Лоренца. Отношение работы  $A_{cm}$ , совершаемой сторонними силами по перемещению заряда  $\Delta q$  вдоль цепи, к значению этого заряда называется *электродвижущей силой*  $\varepsilon$  источника (ЭДС):

$$\varepsilon = A_{cm} / \Delta q.$$

Электродвижущая сила выражается в тех же единицах, что и напряжение или разность потенциалов, т.е. в Вольтах.

Наиболее распространенные источники постоянного тока и батареи, применяемые в различных бытовых приборах (электронных часах, портативных приемниках и магнитофонах, фонариках и т.д.) имеют ЭДС 1.5В, 4.5В, 9В. В автомобилях применяются аккумуляторы с ЭДС 12В (для легковых) и 24В (у некоторых грузовиков).

#### 3.2. Закон Ома для участка цепи.

Немецкий физик Георг Ом (1787-1854) в 1826 году обнаружил, что отношение напряжения  $U$  между концами металлического проводника, являющегося участком электрической цепи, к силе тока  $I$  в цепи есть величина постоянная:

$$U / I = R = const.$$

Эту величину  $R$  называют *электрическим сопротивлением* проводника. Электрическое сопротивление измеряется в Омах. Электрическим сопротивлением  $1 \text{ Ом}$  обладает такой участок цепи, на котором при силе тока  $1 \text{ А}$  напряжение равно  $1 \text{ В}$ :

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В} / 1 \text{ А}.$$

Опыт показывает, что электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально его длине  $L$  и обратно пропорционально площади  $S$  поперечного сечения проводника:

$$R = \rho \cdot L / S.$$

Постоянный для данного вещества параметр  $\rho$  называется *удельным электрическим сопротивлением* вещества. Удельное сопротивление измеряется в Ом·м.

В таблице приводятся значения удельного электрического сопротивления для некоторых материалов и сплавов:

Таблица 3.1. Удельное сопротивление проводников.

Материал	Удельное сопротивление (Ом·м)	Удельное сопротивление (Ом·мм <sup>2</sup> /м)
Алюминий	$2,82 \cdot 10^{-8}$	0,0282
Висмут	$1,2 \cdot 10^{-6}$	1,2
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$	0,055
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	0,098
Золото	$2,42 \cdot 10^{-8}$	0,0242
Константан	$4,9 \cdot 10^{-7}$	0,49
Латунь	$8 \cdot 10^{-8}$	0,08
Манганин	$4,4 \cdot 10^{-7}$	0,44
Медь	$1,72 \cdot 10^{-8}$	0,0172
Молибден	$5,6 \cdot 10^{-8}$	0,056
Никель	$7,24 \cdot 10^{-8}$	0,0724
Нихром	$1 \cdot 10^{-6}$	1
Олово	$1,14 \cdot 10^{-7}$	0,114
Платина	$1,05 \cdot 10^{-7}$	0,105
Свинец	$2,06 \cdot 10^{-7}$	0,206
Серебро	$1,62 \cdot 10^{-8}$	0,0162
Цинк	$5,92 \cdot 10^{-8}$	0,0592

Экспериментально установленную зависимость силы тока  $I$  от напряжения  $U$  и электрического сопротивления  $R$  участка цепи называют *законом Ома для участка цепи*:

$$I = U / R$$

### 3.3. Последовательное и параллельное соединение проводников.

При последовательном соединении  $k$  проводников их общее электрическое сопротивление равно сумме электрических сопротивлений всех проводников:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_k.$$

При параллельном соединении  $k$  проводников величина, обратная общему электрическому сопротивлению цепи, равна сумме обратных величин электрических сопротивлений всех параллельно включенных проводников:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_k.$$

### 3.4. Работа и мощность постоянного электрического тока.

Работа  $A$  электрического тока на участке цепи с электрическим сопротивлением  $R$  за время  $\Delta t$  равна:

$$A = I \cdot U \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

Мощность  $P$  электрического тока равна отношению работы  $A$  тока ко времени  $\Delta t$ , за которое эта работа совершена:

$$P = A / \Delta t = I \cdot U = I^2 \cdot R = U^2 / R.$$

Работа  $A$  электрического тока равна количеству теплоты  $Q$ , выделяемому проводником (если не совершается механическая работа и не происходят химические реакции):

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

Этот закон был экспериментально установлен английским ученым Джеймсом Джоулем (1818-1889) и русским ученым Эмилием Ленцем (1804-1865) и поэтому носит название *закона Джоуля - Ленца*.

### 3.5. Внутреннее сопротивление источника тока.

В электрической цепи, состоящей из источника тока и проводников с электрическим сопротивлением  $R$ , ток совершает работу не только на внешнем, но и на внутреннем участке цепи. Электрическое сопротивление источника тока называется *внутренним сопротивлением*. На внутреннем участке цепи выделяется количество теплоты  $Q_{вн}$ , равное:

$$Q_{вн} = I^2 \cdot r \cdot \Delta t,$$

где  $r$  - внутреннее сопротивление источника тока.

Полное количество теплоты  $Q_{полн}$ , выделяющееся при протекании постоянного тока в замкнутой цепи, внешний и внутренний участки которой имеют сопротивления, соответственно равные  $R$  и  $r$ , равно:

$$Q_{полн} = I^2 \cdot R \cdot \Delta t + I^2 \cdot r \cdot \Delta t = I^2 \cdot (R + r) \cdot \Delta t$$

### 3.6. Закон Ома для полной цепи.

Для замкнутой цепи работа сторонних сил источника тока равна количеству теплоты, выделившейся на внешнем и внутреннем участках цепи, поэтому:

$$\Delta q \cdot \varepsilon = I^2 \cdot (R + r) \cdot \Delta t,$$

откуда

$$\varepsilon = I \cdot (R + r),$$

или

$$I = \varepsilon / (R + r)$$

Последнее выражение называется *законом Ома для полной цепи*.

### 3.7. Конденсатор. Электрическая емкость.

Заряд проводника пропорционален его потенциалу:

$$q = C \cdot \varphi$$

Коэффициент пропорциональности  $C$  называется *электрической емкостью* или просто *емкостью* проводника:

$$C = q / \varphi.$$

*Конденсатор* представляет собой два разноименно заряженных проводящих тела (обкладки), находящихся на небольшом расстоянии друг от друга. Под *зарядом конденсатора* понимается заряд, расположенный на одной из внутренних, обращенных друг к другу, поверхностей этих обкладок. Заряды обкладок равны по модулю и противоположны по знаку.

*Емкость конденсатора* равна отношению заряда конденсатора к разности потенциалов между его обкладками:

$$C = q / U.$$

Емкость не зависит от заряда конденсатора и определяется его формой и размерами. По форме проводящих поверхностей различают плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы.

Емкость *плоского* конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S / d,$$

где  $S$  – площадь поверхности одной пластины;

$d$  – расстояние между пластинами;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала, находящегося между обкладками;

$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

Емкость цилиндрического конденсатора и коаксиального кабеля:

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l / \ln(b/a),$$

где  $b$  и  $a$  – радиусы внешнего и внутреннего цилиндров;

$l$  – длина конденсатора.

Емкость сферического конденсатора:

$$C = 4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / (1/a - 1/b),$$

где  $b$  и  $a$  – радиусы внешней и внутренней сфер.

### 3.8. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов.

При *параллельном* соединении  $k$  конденсаторов полная емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_k.$$

При *последовательном* соединении  $k$  конденсаторов складываются обратные емкостям величины:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_k.$$

Энергия электрического поля заряженного конденсатора равна:

$$W = qU / 2 = CU^2 / 2 = q^2 / (2C).$$

### 3.9. Самоиндукция. Индуктивность проводника.

При любом изменении тока в проводнике возникает ЭДС индукции, которая возбуждается изменением магнитного потока, создаваемого этим же током. Такое явление называется *самоиндукцией*. ЭДС самоиндукции определяется выражением:

$$\varepsilon = -L \cdot \Delta I / \Delta t,$$

где  $L$  – индуктивность проводника, зависящая от его размеров, формы и от свойств среды, в которой находится проводник.

Индуктивность  $L$  связывает магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, с силой тока  $I$  в контуре, создающий этот поток:

$$\Phi = L \cdot I.$$

Индуктивность длинного соленоида с сердечником равна:

$$L = \mu_0 \cdot \mu \cdot N^2 S / l = \mu_0 \cdot \mu \cdot n^2 V,$$

где  $N$  – число витков;

$S$  – площадь поперечного сечения соленоида;

$l$  – длина намотки;

$n = N/l$  – число витков на единицу длины;

$V = Sl$  – объем соленоида;

$\mu$  – магнитная проницаемость сердечника;

$\mu_0 = 12.57 \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> – магнитная постоянная.

Энергия  $W$  магнитного поля, создаваемого проводником с индуктивностью  $L$ , по которому течет ток  $I$ , равна:

$$W = LI^2 / 2.$$

### 3.10. Переменный электрический ток.

Физические процессы, происходящие в цепях *синусоидального переменного тока*, представляют собой установившиеся вынужденные электромагнитные колебания.

Напряжение  $U$ , создаваемое генератором переменного тока, изменяется со временем  $t$  по закону:

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t),$$

где  $U_0$  – амплитуда;

$\omega = 2\pi\nu$  – круговая или циклическая частота колебаний;

$\nu$  – обычная частота колебаний в герцах.

При включении в цепь обычного *омического (активного)* сопротивления  $R$  через него пойдет ток:

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t), \quad I_0 = U_0 / R.$$

Ток изменяется *в фазе* с приложенным напряжением.

При включении конденсатора с емкостью  $C$  через него пойдет ток:

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t + \pi/2), \quad I_0 = U_0 C \omega.$$

Ток *опережает по фазе* напряжение на  $\pi/2$ .

Конденсатору с емкостью  $C$  сопоставляется *емкостное (реактивное)* сопротивление  $R_C = 1 / (\omega C)$ .

При включении катушки с индуктивностью  $L$  через нее пойдет ток:

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t - \pi/2), \quad I_0 = U_0 / (\omega L).$$

Ток *отстает по фазе* от напряжения на  $\pi/2$ .

Катушке с индуктивностью  $L$  сопоставляется *индуктивное (реактивное)* сопротивление  $R_L = \omega L$ .

### 3.11. Последовательная цепь переменного тока.

В *последовательной* цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление  $R$ , емкость  $C$  и индуктивность  $L$ , сила тока  $I$  в каждый момент времени во всех участках цепи одинакова, а сумма мгновенных значений напряжений  $U_R$ ,  $U_C$  и  $U_L$  равна значению приложенного напряжения  $U$  в тот же момент времени:

$$U = U_R + U_C + U_L.$$

Приложенное напряжение и ток в цепи для этого случая имеют следующие зависимости от времени:

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t), \quad I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi).$$

Величины  $I_0$  и  $\varphi$  определяются по формулам:

$$I_0 = U_0 / \{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2\}^{1/2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = [\omega L - 1/(\omega C)] / R.$$

Связь между амплитудным значением тока  $I_0$  и амплитудными значениями напряжений  $U_{OR}$ ,  $U_{OC}$ ,  $U_{OL}$  на отдельных элементах цепи такова:

$$U_{OR} = I_0 \cdot R, \quad U_{OC} = I_0 / (\omega C), \quad U_{OL} = I_0 \cdot \omega L.$$

Мгновенные значения напряжений на отдельных элементах цепи:

$$U_R = I_0 R \cdot \cos(\omega t - \varphi),$$

$$U_L = I_0 \omega L \cdot \cos(\omega t - \varphi + \pi/2),$$

$$U_C = (I_0 / \omega C) \cdot \cos(\omega t - \varphi - \pi/2).$$

### 3.12. Параллельная цепь переменного тока.

При параллельном соединении активного сопротивления  $R$  и реактивных сопротивлений  $R_C$  и  $R_L$  мгновенное значение тока в неразветвленной части цепи равно алгебраической сумме токов в параллельных участках:

$$I = I_R + I_C + I_L,$$

а мгновенное значение напряжения одно и то же на всех участках.

Приложенное напряжение и ток в неразветвленной части цепи определяются выражениями:

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t), \quad I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi),$$

$$I_0 = U_0 \{1/R^2 + [1/(\omega L) - \omega C]^2\}^{1/2},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = R[1/(\omega L) - \omega C].$$

Амплитудные значения токов и напряжения связаны соотношениями:

$$U_0 = I_{0R} \cdot R = I_{0C} / (\omega C) = I_{0L} \omega L.$$

Мгновенные значения токов в отдельных ветвях цепи:

$$I_R = (U_0 / R) \cdot \cos(\omega t),$$

$$I_L = [U_0 / (\omega L)] \cdot \cos(\omega t - \pi/2),$$

$$I_C = U_0 \omega C \cdot \cos(\omega t + \pi/2).$$

### 3.13. Мощность в цепи переменного тока.

Мгновенная мощность в цепи переменного тока равна:

$$P(t) = U \cdot I = U_0 \cdot I_0 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi).$$

Средняя мощность в цепи переменного тока равна:

$$P = (1/2) U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi.$$

Если ввести *действующие (эффективные)* значения напряжения и тока:

$$U_{\text{эф}} = U_0 / (2)^{1/2} \quad \text{и} \quad I_{\text{эф}} = I_0 / (2)^{1/2},$$

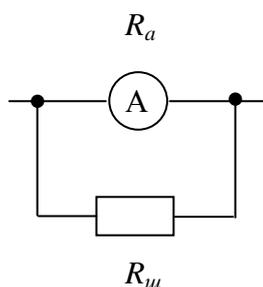
То выражение для мощности примет вид:

$$P = U_{\text{эф}} \cdot I_{\text{эф}} \cdot \cos \varphi$$

### 3.14. Электроизмерительные приборы.

#### 3.14.1. Амперметр.

*Амперметр* служит для измерения *силы тока* в электрической цепи. Он состоит из стрелочного прибора - гальванометра с внутренним сопротивлением  $R_a$  и параллельно подключенного к нему шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$ . Собственное (внутреннее) сопротивление  $R_a$  гальванометра должно быть как можно меньше, чтобы при измерении силы тока в данном участке цепи падение напряжения на приборе было ми-



нимальным. Шунт в амперметре нужен для расширения диапазона измерений силы тока.

Для увеличения диапазона измерений в  $n$  раз требуется сопротивление шунта:

$$R_{ш} = R_a / (n-1).$$

Амперметр всегда включается *последовательно* с тем участком цепи, в котором измеряется сила тока.

### 3.14.2. Вольтметр.

Прибор для измерения напряжения называют *вольтметром*.

Он состоит из стрелочного прибора - гальванометра с внутренним сопротивлением  $R_g$  и последовательно подключенного к нему добавочного сопротивления  $R_d$ . Собственное (внутреннее) сопротивление  $R_g$  вольтметра должно быть как можно больше, чтобы при измерении напряжения на данном участке цепи ток



через прибор был минимальным. Добавочное сопротивление в вольтметре нужно для расширения диапазона измерений.

Для увеличения диапазона измерений в  $n$  раз требуется добавочное сопротивление:

$$R_d = R_g(n-1).$$

Вольтметр всегда подключается *параллельно* тому участку цепи, на котором измеряют падение напряжения.

Современные цифровые электроизмерительные приборы не содержат механических стрелочных систем, однако, принципы работы с ними остаются такими же.

## 3.15. Характеристика деталей электрических схем и их маркировка.

### 3.15.1. Резисторы.

Конструкция и технология изготовления резисторов имеют большое разнообразие. Различают резисторы постоянного и переменного сопротивления, проволочные, непроволочные, углеродистые, металлопленочные, композиционные, полупроводниковые и т.д.

Резисторы характеризуются следующими параметрами:

Номинальное сопротивление в Омах (кило омах, мегомах);

Максимальная (рабочая) мощность в Ваттах (милливаттах);

Температурный коэффициент сопротивления ТКС;

Максимальное напряжение;

Погрешность или класс точности в процентах.

Значение номинального сопротивления указывается на детали цифрами или с помощью цветового кода. Действительное сопротивление резистора может отличаться от номинального, но не более допустимого значения, определяемого классом точности.

Стандартный ряд значений сопротивления зависит от класса точности резистора. Наиболее распространенные детали относятся к классам точности, соответствующим 20%, 10% и 5%. Например, класс точности, соответствующий отклонению в 10% (ряд E12 по ГОСТу) содер-

жит следующий стандартный набор значений сопротивления (Ом, кОм, МОм):

1.0, 1.2, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2, 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82, 100, 120, 150, 180, 220, 270, 330, 390, 470, 560, 680, 820.

При обозначении номиналов сопротивлений на резисторах и принципиальных электрических схемах вместо десятичной точки используются соответствующие буквы: Е (или R)– для омов, К – для килоомов, М – для мегомов. Например, сопротивления в 5.6 Ом, 68 кОм, 820 кОм следует обозначать как 5Е6, 68К, М82 соответственно.

Наиболее распространенные резисторы имеют следующие значения номинальной мощности (в Ваттах):

0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 и более.

ТКС характеризует относительное (в процентах) изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1°С. Обычно, ТКС составляет десятые или сотые доли процентов для большинства резисторов.

Максимальное напряжение резистора зависит от его конструкции и определяется условиями возникновения электрического пробоя.

### 3.15.2. Конденсаторы.

Конденсаторы, как и резисторы, отличаются большим разнообразием по конструкции и технологии изготовления. Существуют переменные, подстроечные, постоянные конденсаторы. Они бывают полярные и неполярные, металлобумажные, электролитические, стеклянные, керамические, танталовые, фторопластовые и т.д.

Конденсаторы характеризуются следующими параметрами.

- Номинальная емкость в Фарадах (пФ, нФ, мкФ);
- Максимальное (рабочее) напряжение в Вольтах;
- Температурный коэффициент емкости ТКЕ;
- Потери энергии (утечка заряда);
- Собственная индуктивность.

По классам точности конденсаторы делятся следующим образом:

Класс	001	002	005	00	0	I	II	III	IV	V	VI
Отклонение %	±0.0 1	±0.2	±0.5	±1	±2	±5	±10	±20	-10 +20	-20 +30	-20 +50

Чаще всего применяются конденсаторы I, II, III классов точности.

Учет потерь энергии в конденсаторе важен в высокоточных и времязадающих цепях.

Собственную индуктивность необходимо учитывать при работе на высокочастотных режимах.

Стандартные ряды значений емкости такие же, как для сопротивлений соответствующего класса точности.

В цепях переменного синусоидального тока конденсатор имеет реактивное (емкостное) сопротивление  $R_C = 1/\omega C$ , которое зависит от частоты  $\omega$  переменного тока.

### 3.15.3. Катушки индуктивности.

Катушки индуктивности применяют в качестве элементов колебательных контуров, фильтров и дросселей. Дроссели обычно служат для разделения переменной и постоянной составляющих тока.

Конструктивно катушки отличаются геометрией и способом намотки, наличием сердечника и металлического экрана и т.д.

Катушки индуктивности характеризуются следующими параметрами:

- Индуктивность в Генри;
- Добротность;
- Стабильность;
- Собственная емкость.

Добротность определяется отношением индуктивного сопротивления к активному сопротивлению катушки на данной частоте:

$$Q_L = R_L / R = \omega L / R$$

и характеризует потери энергии в катушке.

Собственную емкость катушки необходимо учитывать при работе на высоких частотах.

Стабильность характеризует степень влияния внешних причин на изменение параметров катушки (ее индуктивности и добротности).

## Глоссарий

1. **Абстрактная модель** - абстрактный объект или явление, которые мы рассматриваем взамен реального объекта или явления в данной задаче.
2. **Батарея** – собрание нескольких однотипных приборов или устройств, составляющих единую систему для совместного действия.
3. **Вакуум** – состояние газа при давлениях значительно ниже атмосферного давления.
4. **Вещество** – вид материи, обладающий массой покоя.
5. **Взаимодействие** – четыре взаимодействия, лежащие в основе всех природных процессов. – сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.
6. **Конфигурация** - взаимное расположение частей системы.
7. **Принцип эквивалентности:** силы инерции и тяготения локально неразличимы.
8. **Сверхпроводимость** – Явление скачкообразного падения до нуля электрического сопротивления некоторых веществ при низких температурах.
9. **Сверхтекучесть** – состояние квантовой жидкости, при котором она протекает через узкие капилляры и щели без трения.
10. **Система материальных точек** - это некоторая совокупность конечного числа материальных точек.
11. **Точкой приложения равнодействующей** называется точка, относительно которой суммарный момент сил равен нулю.
12. **Физическая модель** - реальный объект или явление, которые мы рассматриваем в данной задаче взамен другого реального объекта или явления (*например, шарики как модель газа*).

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### Тема: Механика

**Цель:** Применение основных положений и законов физики к решению основной задачи механики.

#### **1. Кинематика материальной точки /1/.**

№ задач: 1.1, 1.2, 1.10, 1.13, 1.23, 1.34, 1.47

#### **2. Динамика материальной точки /1/.**

№ задач: 2.1, 2.2, 2.9, 2.11, 2.29, 1.34, 1.47

#### **3. Законы сохранения импульса и энергии /1/.**

№ задач: 2.31, 2.34, 2.35, 2.38, 2.39, 2.45, 1.50, 2.52

#### **4. Динамика твердого тела /1/.**

№ задач: 3.1, 3.7, 3.25, 3.31, 3.35.

#### **5. Гармонические колебания /1/.**

№ задач: 6.1, 6.8, 6.32, 6.36, 6.57, 6.61

#### **6. Тема: Молекулярная физика и термодинамика /1/.**

**Цель:** Применение основных положений МКТ и термодинамики к определению основных параметров системы, процессов происходящих в газах.

№ задач: 9.12, 9.25, 11.25, 11.53, 9.20

### Тема: Электричество и магнетизм

**Цель:** Расчет электрических и магнитных полей по данному расположению токов и зарядов.

#### **7. Постоянное электрическое поле в вакууме /1/.**

№ задач: 13.2, 13.6, 13.10, 13.13, 14.1

#### **8. Методы расчета электростатических полей /1/.**

№ задач: 14.3, 14.6, 14.11, 14.22, 14.38

#### **9. Потенциал. Энергия электрического поля /1/.**

№ задач: 15.1, 15.5, 15.37, 15.41, 15.51, 18.1

#### **10. Постоянный электрический ток /1/.**

№ задач: 19.1, 19.2, 19.6, 19.13, 19.14, 19.19, 19.25, 19.29, 19.33

#### **11. Магнитное поле в вакууме /1/.**

№ задач: 21.1, 21.4, 21.6, 21.14, 21.15, 21.19, 19.21, 21.35

#### **12. Сила, действующая на проводник с током и заряды в магнитном поле /1/.**

№ задач: 22.1, 22.6, 22.16, 22.14, 22.25, 22.27, 23.5, 23.20, 23.21

**13. Работа в магнитном поле. Электромагнитная индукция /1/.**

№ задач: 25.1, 25.6, 25.11, 25.13, 25.30, 25.32, 25.34, 25.40, 25.42

**14. Энергия магнитного поля /1/.**

№ задач: 26.1, 26.13, 26.18, 26.22, 26.23

**Тема: Оптика**

**Цель:** Изучение оптических законов и их применение к анализу конкретных явлений.

**15. Геометрическая оптика. Фотометрия /1/.**

№ задач: 28.9, 28.12, 28.20, 28.24

**16. Интерференция света /1/.**

№ задач: 30.4, 30.7, 30.10, 30.12, 30.16

**17. Дифракция света /1/.**

№ задач: 31.2, 31.10, 31.13, 31.14, 31.15, 31.18, 31.31

**18. Поляризация света /1/.**

№ задач: 32.1, 32.4, 32.11, 32.15, 32.19, 32.22

**19. Квантовая физика /1/.**

№ задач: 34.1, 34.2, 34.6, 34.10, 34.11, 34.14, 34.16

**20. Фотоэффект. Давление света. Эффект Комптона /1/.**

№ задач: 35.2, 35.3, 35.5, 35.6, 36.2, 36.12, 37.1, 37.2, 37.4

**Тема: Элементы атомной и ядерной физики**

**Цель:** Изучение законов атомной и ядерной физики и их применение к анализу конкретных явлений.

**21. Физика атомов и молекул /1/.**

№ задач: 38.1, 38.4, 38.5, 38.10, 38.11

**22. Атомное ядро и элементарные частицы /1/.**

№ задач: 40.7, 40.41, 41.4, 41.8, 41.19, 43.5, 43.13, 44.1, 44.16

**Литература:**

1. Чертов А. Г. Воробьев А.А. Задачник по Физике, М., 1981- 2000.
2. Волькенштейн Б.С. Сборник задач по общему курсу физики. М., 1979 – 1985-2000.
3. Ветрова Т.В. Сборник задач по физике. Минск, «ВШ». 1991.

### Литература.

1. Виртуальная физическая лаборатория. Комплекс компьютерных тренажеров. Толстик А.М., ТГУ, 1998.
2. Начала электроники. Руководитель проекта Кашкаров В.В., Алматы, КазНУ им. Аль-Фараби, 2000.
3. Программа «Виртуальные лабораторные работы по физике». ЗАО «Новый Диск», 2007.
4. Детлаф А. А. Яворский Б. М. Курс Физики, М., 2000.
5. Трофимова Т.И. Курс Физики, М., 2001.
6. Абельдина Ж.К. Курс избранных лекций по физике с элементами электронного обучения, Астана, 2002.
7. Практикум по Физике. Оптика Ж.К. Абельдина Ж.К. и др. Астана, 1999.
8. Учебно-методический комплекс по физике для инженерных специальностей. Абельдина Ж.К. и др. Астана, 2004.
9. Грабовский Р.И. Курс физики: Учебник для вузов. Изд. 6-е - 608 с. {Учебники для вузов: Специальная литература}, СПб: Лань, 2002.
10. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для вузов. В 5 книгах. М., Астрель/ АСТ 2003.
11. Пул Ч. Справочное руководство по физике: Фундаментальные концепции, основные уравнения и формулы (пер. с англ. Фоминой М.В. и др.) - 461 с. М: Мир, 2001.
12. Трофимова Т.И. Физика: 500 основных законов и формул: Справочник для студентов вузов Изд. 3-е - 63 с. М: Высшая Школа, 1999.
13. Птицина Н.Г., Соина Н.В., Гольцман Г.Н. и др. Сборник вопросов и задач по общей физике Изд. 2-е, испр. - 328 с. {Высшее образование} М: Академия, 2002.
14. Абельдина Ж.К. Физика. Учебно-методический комплекс. Астана, 2010.
15. Абельдина Ж.К., Нурбаева Э.А. Виртуальная физика. Учебное пособие. КАТУ им. С. Сейфуллина, г. Астана, 2011 г. - ISBN 9965–799–26–1с. 1-153.
16. Абельдина Ж.К. Физика. Учебно-методический комплекс (для студентов дистанционной формы обучения). Астана, 2012.

## 1. КРАТКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ.

### 1.1. Назначение и общие особенности программы.

Продукт /2/ предназначен в помощь учащимся (и преподавателям) для изучения разделов курса физики "Электричество". Он естественным образом дополняет классическую схему обучения, состоящую из усвоения теоретического материала и выработки практических навыков экспериментирования в физической лаборатории.

Программа представляет собой электронный конструктор, позволяющий имитировать на экране монитора процессы сборки электрических схем, исследовать особенности их работы, проводить измерения электрических величин так, как это делается в реальном физическом эксперименте.

С помощью конструктора можно:

- изучать зависимость сопротивления проводников от удельного сопротивления его материала, длины и поперечного сечения;
- изучать законы постоянного тока - закон Ома для участка цепи и закон Ома для полной цепи;
- изучать законы последовательного и параллельного соединения проводников, конденсаторов и катушек;
- изучать принципы использования предохранителей в электронных схемах;
- изучать законы выделения тепловой энергии в электронагревательных и осветительных приборах, принципы согласования источников тока с нагрузкой;
- ознакомиться с принципами проведения измерений тока и напряжения в электронных схемах с помощью современных измерительных приборов (мультиметр, двухканальный осциллограф), наблюдать вид переменного тока на отдельных деталях, сдвиг фаз между током и напряжением в цепях переменного тока;
- изучать проявление емкостного и индуктивного сопротивлений в цепях переменного тока, их зависимость от частоты генератора переменного тока и номиналов деталей;
- изучать выделение мощности в цепях переменного тока;
- исследовать явление резонанса в цепях с последовательным и параллельным колебательным контуром;
- определять параметры неизвестной детали;
- исследовать принципы построения электрических фильтров для цепей переменного тока.

Конструктор можно также использовать в рамках его возможностей и для других задач в самостоятельной творческой работе учащихся.

Одной из главных особенностей комплекса является максимально возможная имитация реального физического процесса. Для этой цели предусмотрено, например, следующее:

- изображения деталей конструктора и измерительных приборов приводятся не схематически, а в таком виде, как "на самом деле";
- при превышении номинальной мощности электрического тока, протекающего через сопротивление, последнее "сгорает" и приобретает вид почерневшей детали;
- лампочка и электронагревательный прибор при номинальной мощности начинают светиться и "перегорают", если мощность, рассеиваемая на них, превышает рабочее значение;
- при превышении рабочего напряжения на конденсаторе, последний также "выходит из строя";
- при превышении номинального рабочего тока через предохранитель, он "перегорает";
- большинство операций и их результаты сопровождаются звуковыми эффектами.

Это делается для того, чтобы учащийся наглядно видел последствия своих ошибок, учился разбираться в причинах того или иного неудачного эксперимента и вырабатывал необходимые навыки предварительного анализа схемы.

Для пользования программой достаточно начальных навыков работы в системе Windows.

### **1.2. Технические требования к оборудованию.**

Для нормальной работы программы необходимы:

- Процессор Pentium (либо его аналог);
- ОЗУ 8 Мб или более;
- Монитор с разрешающей способностью не менее 800x600 и видеокарта, работающая в этом режиме с цветностью не менее 65 тыс. цветов;
- Операционная система: Windows 95, Windows 98 или Windows NT; Windows XP.
- Для поддержки звуковых эффектов необходима звуковая плата;
- Манипулятор "мышь".

### **1.3. Содержание рабочего окна и основные принципы работы с комплексом.**

При запуске программы, на экран монитора компьютера выводятся:

- монтажный стол с контактными площадками, на котором можно собирать и анализировать работу электрических схем (в центре экрана);

- панель деталей, содержащая набор электрических элементов (в правой части экрана);
- "мусорная корзина", куда выбрасываются перегоревшие и ненужные детали (она расположена в левом нижнем углу экрана);
- панель управления программой с кнопками для вызова вспомогательных инструментов (расположена в верхней части экрана);
- панель комментариев (в нижней части экрана).

### 1.3.1. Монтажный стол.

Монтажный стол представляет собой набор из  $7 \times 7 = 49$  контактных площадок, к которым "припаиваются" электрические детали, для сборки различных электрических схем. Каждая деталь может располагаться лишь между двумя ближайшими контактными площадками или вертикально или горизонтально. К деталям, в точки их соединения с контактными площадками, можно подключать щупы измерительных приборов. Выбор деталей из набора конструктора и "пайка" их на рабочем столе производится с помощью манипулятора "мышь". Это делается стандартным для Windows – приложений способом – необходимо поместить указатель "мыши" на нужную деталь (указатель принимает вид пинцета), затем нажать левую кнопку "мыши" и, удерживая ее в нажатом состоянии, переместить деталь в нужное место монтажного стола. После освобождения левой кнопки "мыши", деталь будет установлена в указанном месте. Ненужные и "испорченные" детали можно удалить со стола в "мусорную корзину" таким же способом.

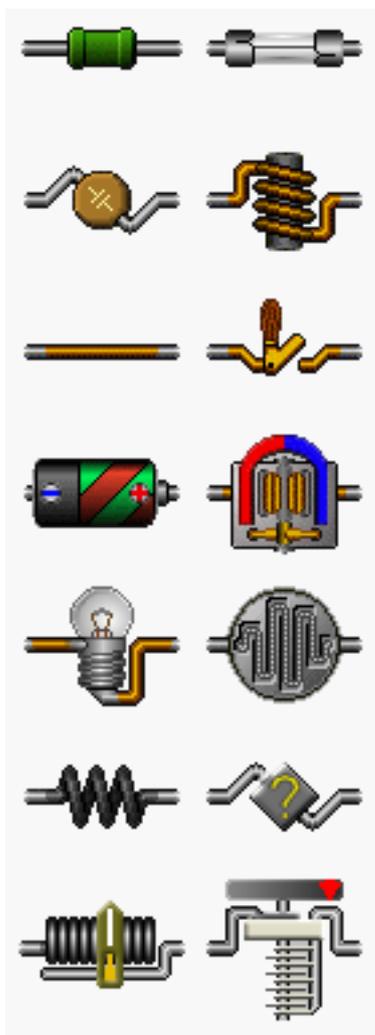
Можно удалять детали со стола и другим методом. Необходимо "щелкнуть" на детали правой кнопкой "мыши" – появится окно с надписью "Выбросить деталь". После подтверждения (щелчка на кнопке), деталь будет удалена в корзину.

Детали, "выброшенные" за пределы монтажного стола, но не в корзину, накапливаются в нижней части монтажного стола.

На столе одновременно не могут быть расположены источники переменного и постоянного тока.

### 1.3.2. Панель деталей конструктора.

В конструкторе можно использовать следующие детали:



тивлением в Омах);

- резистор (характеризуется сопротивлением в Омах и мощностью в Ваттах, "сгорает" при ее превышении);
- предохранитель (характеризуется максимальным рабочим током, "сгорает" при его превышении);
- конденсатор (характеризуется ёмкостью в Фарадах и рабочим напряжением, выходит из строя при его превышении);
- катушка индуктивности (характеризуется индуктивностью в Генри, имеет очень малое активное сопротивление);
- монтажный провод (имеет очень малое сопротивление);
- выключатель (характеризуется двумя состояниями - "разомкнуто" и "замкнуто");
- элемент питания (характеризуется полярностью, ЭДС в Вольтах и внутренним сопротивлением в Омах);
- генератор синусоидального напряжения (характеризуется амплитудой и частотой переменного напряжения);
- лампочка (характеризуется рабочим напряжением в Вольтах, рабочим током в миллиамперах или мощностью в Ваттах, "перегорает" при их превышении);
- электронагреватель (характеризуется рабочим напряжением и рабочей мощностью, "перегорает" при их превышении);
- реальный проводник (характеризуется материалом, длиной и площадью сечения);
- неизвестная деталь (может быть резистором, конденсатором, катушкой, батареей или генератором);
- реостат (характеризуется максимальным сопротивлением в Омах);

- конденсатор переменной ёмкости (характеризуется максимальной ёмкостью в Фарадах).

### 1.3.3. Описание функций кнопок панели управления.



*Загрузить схему из файла.*

Кнопка открывает окно с папкой, в которой хранятся файлы со схемами, сохраненными ранее командой "Сохранить схему как...". Можно выбрать файл с необходимой схемой и открыть его стандартным способом, что приведет к появлению схемы в готовом виде на монтажном столе.



*Сохранить схему как...*

Кнопка открывает окно, в котором необходимо указать имя файла для сохраняемой схемы, и при необходимости указать папку, в которой следует поместить файл. Схема, расположенная на монтажном столе, будет сохранена в указанном файле и папке. На монтажном столе схема останется. В дальнейшем, сохраненная схема может быть вызвана на монтажный стол командой "Загрузить схему из файла".



*Очистить монтажный стол.*

Кнопка удаляет собранную на монтажном столе схему. После подтверждения операции схема *удаляется безвозвратно!*



*Получить мультиметр.*

Нажатие кнопки приводит к появлению на рабочем столе измерительного прибора "Мультиметр". Можно одновременно иметь не более двух мультиметров. Убрать мультиметр можно стандартным способом – "щелкнув" на кнопке  в его правом верхнем углу.



*Получить осциллограф.*

Нажатие кнопки приводит к появлению двухканального осциллографа. Убрать осциллограф можно так же как мультиметр.



*Показать/Спрятать окно "Параметры детали".*

Кнопка показывает или прячет окно "Параметры детали", в котором можно просматривать и изменять параметры выбранной на монтажном столе детали. Выбор детали осуществляется установкой на нее указателя "мыши" (он принимает вид пинцета) и щелчком левой кнопки мыши. Выбранная деталь отмечается желтыми метками. Изменять значения параметров можно двумя способами: или выбирать их из выпадающего списка, после нажатия кнопки  $\tau$  справа от окна значения параметра, или заданием значения с клавиатуры (для этого необходимо сначала открыть выпадающий список).

Окно "Параметры детали" автоматически появляется на экране после двойного "щелчка" левой кнопкой на детали.



*Показать/Спрятать окно "Состояние детали".*

Кнопка показывает или прячет окно "Состояние детали", в котором можно видеть действительную и мнимую части сопротивления, тока, напряжения и мощности, рассеиваемой на детали в данный момент времени. Это окно предназначено для отладки и контроля работы схемы, выполняемой учителем. Поэтому данная кнопка появляется на панели управления лишь при запуске программы в режиме "учителя" (с E.EXE/teacher). Это сделано для того, чтобы ученик не мог воспользоваться столь простым способом решать задачи, а делал бы это с помощью проведения реальных измерений предоставленными ему приборами!



*Язык.*

Данная кнопка открывает окно, в котором можно выбрать язык (русский или казахский) для текстов справочной системы, описаний лабораторных работ и справочника по электричеству.



*Справочник по электричеству.*

Кнопка открывает окно, со справочными материалами, составленными из кратких описаний данного раздела курса, содержащих формулы, иллюстрации и примеры.



*Лабораторные работы.*

Кнопка открывает окно с описаниями набора лабораторных работ, предлагаемых учащимся для выполнения. В работах приводится краткая теория, методика выполнения, указания по измерениям и расчетам, которые необходимо провести, а также контрольные вопросы для оценки усвоения материала.



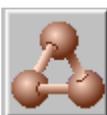
*Как работать с программой?*

Эта кнопка открывает окно со справочной информацией, содержащей описание правил работы с программой.



*Калькулятор Windows.*

Кнопка вызывает стандартный калькулятор Windows.



*О программе.*

Кнопка отображает сведения об авторах данного программного продукта.



*Выход из программы.*

Кнопка приводит к завершению работы с программой. Программа запрашивает о сохранении электрической схемы, находящейся на монтажном столе. *Не сохраненная на рабочем столе схема теряется!*

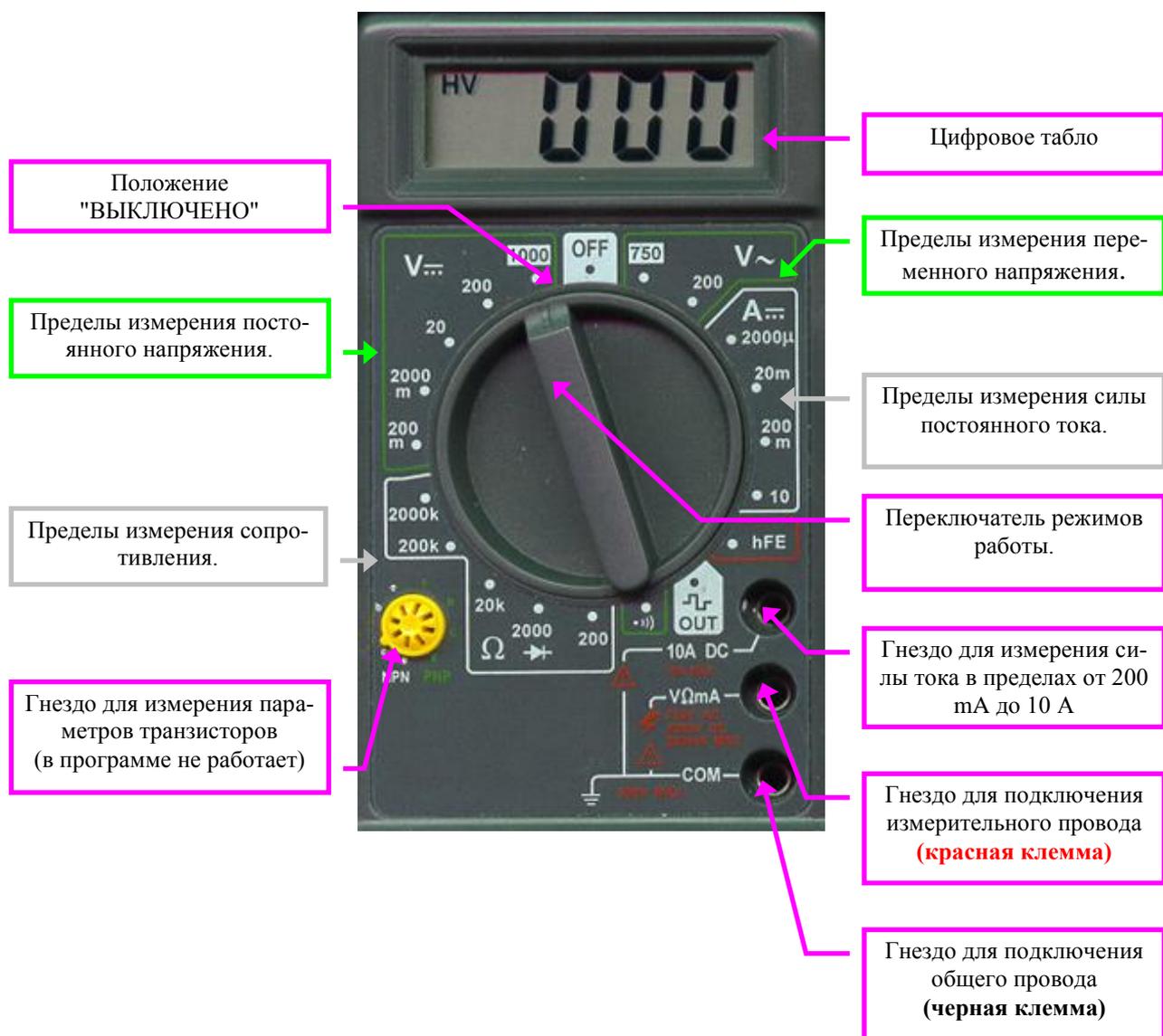
#### 1.3.4. Панель комментариев.

На панели комментариев выводятся сведения о деталях и подсказки о назначении кнопок панели управления. Эта информация появляется после установки указателя "мыши" на соответствующие элементы.

## 1.4. Цифровой мультиметр.

### 1.4.1. Общий вид и назначение деталей мультиметра.

Общий вид мультиметра показан на рисунке:



На рисунке показаны расположение элементов управления и гнезд для подключения мультиметра к электронной схеме. Переключение режимов работы и пределов измерения производится "щелчком" манипулятора "мышь" на метках соответствующих пределов (при установке указателя на пределы он принимает вид руки).

#### 1.4.2. Правила работы с мультиметром.

1. Мультиметр вызывается на экран (рабочий стол) нажатием кнопки "Получить мультиметр" на верхней панели окна программы. Следующее нажатие на эту кнопку вызывает второй прибор (при этом кнопка блокируется). Для удаления прибора нужно щелкнуть на кнопке  в правом верхнем углу окна мультиметра. Прибор вместе со своими зажимами исчезает с экрана.

2. Подключение мультиметра к точкам исследуемой схемы производится установкой в нужные места общего (темно-синего) и измерительного (красного) зажимов, соединенных с соответствующими гнездами прибора. Соединительные провода прибора на экране не показываются, чтобы не загромождать монтажный стол.

Для подключения прибора к исследуемой схеме необходимо:

- \* установить указатель "мышки" на нужный зажим прибора (указатель примет вид руки);
- \* нажать и удерживать левую кнопку "мышки";
- \* перетащить зажим (удерживая кнопку) в нужную точку схемы и отпустить кнопку "мышки".

Если в процессе работы требуется переключить зажимы в другие места схемы, то используется эта же процедура. Перенос зажима на область прибора приводит к его автоматической "парковке" на соответствующее входное гнездо мультиметра.

3. Переключение режимов работы прибора осуществляется установкой указателя "мышки" на соответствующую точку панели прибора (при этом указатель изменяет свой вид) и щелчком левой кнопки "мышки". Переключатель режимов работы мультиметра поворачивается в отмеченную позицию.

4. На цифровом табло прибора отображается числовое значение измеряемой величины (тока, напряжения, сопротивления) в единицах, указанных на выбранном пределе измерения. Если в левой части табло высвечивается -1 (переполнение), это говорит о том, что значение измеряемой величины превышает максимальное значение выбранного предела измерения. Необходимо переключить прибор на другой предел.

5. Вы можете использовать для работы один или два мультиметра, которые имеют номера 1 и 2. Зажимы приборов также имеют соответствующие номера. Приборы могут использоваться одновременно и независимо. Например, первым прибором можно измерять напряжение, а вторым - ток, в разных частях исследуемой схемы.

#### 1.4.3. Измерения с помощью мультиметра.

Мультиметр позволяет проводить измерения:

- напряжений постоянного и переменного тока;

- силы постоянного тока;
- сопротивлений участков цепи постоянного тока.
- проверять наличие контактов с использованием звуковой сигнализации.

#### 1.4.4. Измерение напряжений.

Для измерения напряжения на участке исследуемой цепи необходимо учитывать следующее:

\* Вольтметр всегда включается *параллельно* участку цепи, на котором измеряют напряжение (реальный вольтметр может выйти из строя при неправильном включении!);

\* Какой вид тока - постоянный или переменный, протекает в цепи? Переключатель режимов работы необходимо установить в соответствующую позицию;

\* Вольтметр показывает эффективное значение переменного напряжения;

\* При измерении постоянных напряжений вольтметр показывает значение с учетом полярности - если потенциал на измерительном зажиме меньше, чем на общем, на табло высвечивается знак "минус";

\* Пределы измерения постоянного напряжения: 1000 В, 200 В, 20 В, 2000 мВ, 200 мВ.

\* Пределы измерения переменного напряжения: 750 В, 200 В.

\* Входное сопротивление прибора в режиме вольтметра равно 1 МОм.

#### 1.4.5. Измерение силы постоянного тока.

Для измерения силы тока на участке исследуемой цепи необходимо учитывать следующее:

\* Амперметр всегда включается *последовательно* в участке цепи, где измеряется сила тока (реальный амперметр может выйти из строя при неправильном включении!);

\* Наш амперметр может измерять только силу постоянного тока;

\* При измерении силы тока в цепи, амперметр показывает его значение с учетом полярности: если ток через прибор течет от общей клеммы к измерительной, на табло высвечивается знак "минус";

\* Пределы измерения силы постоянного тока: 10 А, 200 мА, 20 мА, 2000 мкА;

\* Входное сопротивление амперметра очень мало (около  $10^{-6}$  Ом)

## 1.4.6. Измерение сопротивлений.

Для измерения сопротивлений необходимо учитывать следующее:

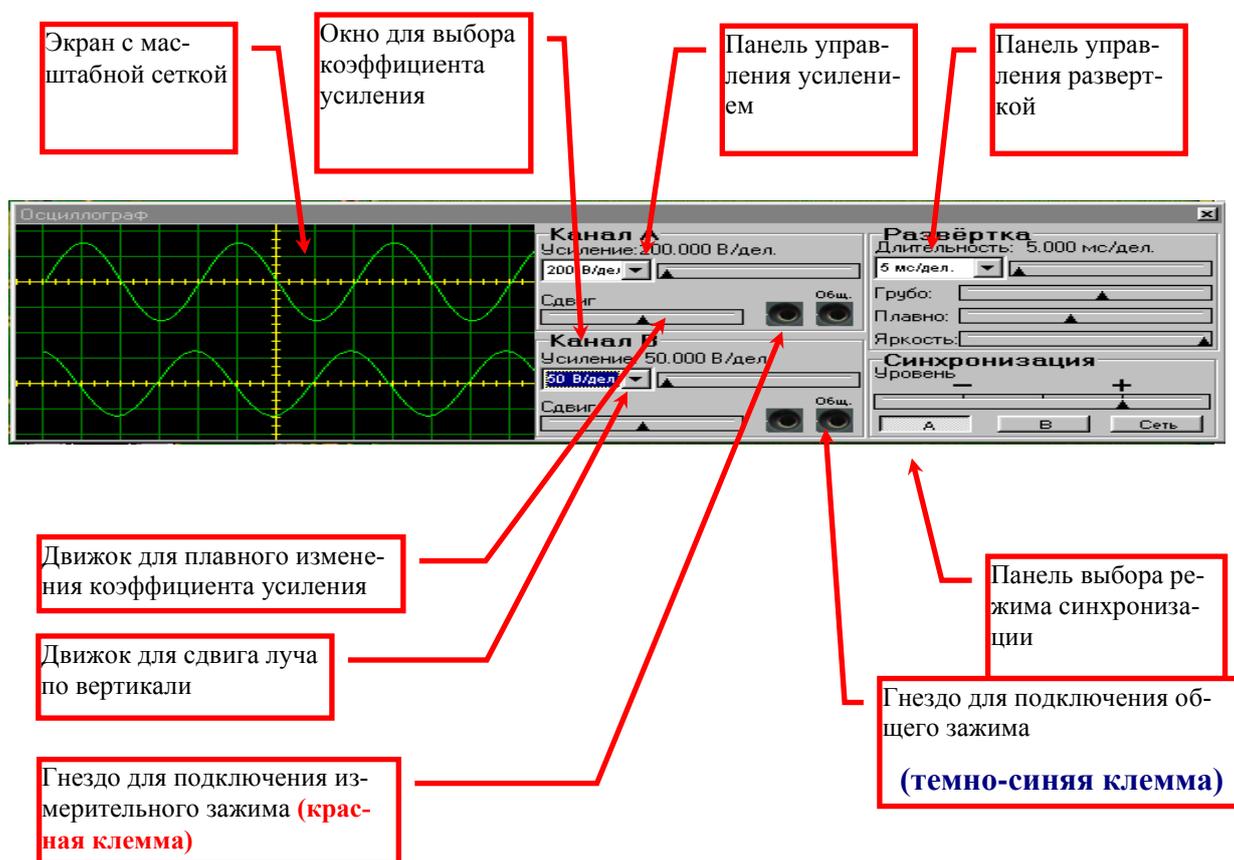
- Омметр может измерять только активное сопротивление элементов схемы;
- Пределы измерения сопротивлений: 2000 кОм, 200 кОм, 20 кОм, 2000 Ом, 200 Ом и специальный предел для определения контактов со звуковой сигнализацией;
- На измеряемый участок схемы прибор подает напряжение 2 В;
- Прибором можно определять наличие контакта в схеме, при этом, если сопротивление измеряемого участка меньше 75 Ом, подается звуковой сигнал.

## 1.5. Двухканальный осциллограф.

Осциллограф предназначен для визуального наблюдения формы переменного напряжения. Он позволяет также определять количественные характеристики сигнала: частоту и амплитуду переменного напряжения, длительность импульса, сдвиг фаз между двумя периодическими сигналами (для этого осциллограф должен быть двухканальным).

Входное сопротивление осциллографа достаточно велико (около 10 МОм).

### 1.5.1. Общий вид и назначение деталей осциллографа



Лицевая панель осциллографа содержит следующие части:

- Экран с масштабной сеткой для наблюдения формы сигнала и количественных измерений;
- Панель управления усилением каналов и сдвига лучей по вертикали;
- Панель управления разверткой, сдвига лучей по горизонтали, выбора режимов синхронизации и некоторых вспомогательных функций.

### 1.5.2. Правила работы с осциллографом.

1. Осциллограф вызывается на экран (рабочий стол) нажатием кнопки "Получить осциллограф" на верхней панели окна программы. Для удаления осциллографа нужно щелкнуть на кнопке  в правом верхнем углу его окна. Осциллограф вместе со своими зажимами исчезает с экрана.

2. Подключение осциллографа к точкам исследуемой схемы производится установкой в нужные места общего (темно-синего) и измерительного (красного) зажимов, соединенных с соответствующими гнездами осциллографа. Соединительные провода на экране не показываются, чтобы не загромождать монтажный стол. Зажимы имеют обозначения (буквы А и В), соответствующие каналам осциллографа.

Для подключения осциллографа к исследуемой схеме необходимо:

- \* установить указатель "мышки" на нужный зажим прибора (указатель примет вид руки);
- \* нажать и удерживать левую кнопку "мышки";
- \* перетащить зажим (удерживая кнопку) в нужную точку схемы и отпустить кнопку "мышки".

Если в процессе работы требуется переключить зажимы в другие места схемы, то используется эта же процедура. Перенос зажима на область прибора приводит к его автоматической "парковке" на соответствующее входное гнездо осциллографа.

3. Установка режимов работы осциллографа осуществляется с помощью регулировки коэффициентов усиления каналов, выбора длительности развертки, режима синхронизации и регулировкой вспомогательных функций.

4. На экране осциллографа нанесена измерительная сетка, с помощью которой можно проводить количественные измерения параметров сигнала.

5. Вы можете использовать для работы один или два канала одновременно. Зажимы осциллографа имеют обозначения "А" и "В", соответственно каналам "А" и "В".

### 1.5.3. Описание органов управления осциллографом.

#### Установка коэффициента усиления.

Для того чтобы изображение сигнала на экране осциллографа не выходило за пределы экрана или не имело слишком малой амплитуды, необходимо правильно выбрать коэффициент усиления канала.

Коэффициент усиления осциллографа задается в Вольтах/деление. Это означает, например, что цена деления шкалы экрана осциллографа по вертикали будет равна 500 мВ, если значение коэффициента усиления выбрать равным 500 мВ/дел.

Коэффициент усиления осциллографа можно изменять в окне "Усиление" путем выбора нужного значения из предложенного списка. Этот список открывается при нажатии на кнопку  $\tau$ , расположенную справа от окна. Кроме того, можно плавно изменять коэффициент усиления в некоторых пределах с помощью движка  $\sigma$ , расположенного правее окна с кнопкой. Для этого необходимо установить указатель "мыши" на этот значок, нажать левую кнопку "мыши" и, удерживая ее в нажатом состоянии переместить движок в нужную позицию.

Движок "Сдвиг по вертикали" позволяет смещать луч осциллографа вверх или вниз.

#### Выбор режима развертки.

Для правильного отображения периодического сигнала необходимо также выбрать соответствующую длительность развертки осциллографа.

Длительность развертки задается в единицах время/деление. Это означает, например, что цена деления шкалы экрана осциллографа по горизонтали будет равна 20 мс, если значение длительности развертки выбрать равным 20 мс/дел. Численное значение длительности развертки задается способами, аналогичными для установки коэффициента усиления.

Движок "Уровень синхронизации" устанавливает момент времени начала развертки сигнала, соответствующий заданному значению его амплитуды. Эта регулировка может оказаться полезной для численного определения фазового сдвига между двумя сигналами. Кнопки "А" и "В" выбирают канал, по которому осуществляется синхронизация развертки. Кнопка "Сеть" переключает развертку обоих каналов осциллографа от внутреннего генератора синусоидального напряжения. Этот режим используется для наблюдения сложения перпендикулярных колебаний – фигур Лиссажу.

Движком "Яркость" можно изменять интенсивность свечения лучей осциллографа (при этом яркость масштабной сетки не изменяется).

### 1.5.4. Измерения с помощью осциллографа.

Осциллограф позволяет проводить измерения:

- амплитуды напряжения переменного тока;
- частоты переменного напряжения;
- сдвиг фазы между двумя сигналами.

**1. Физические основы классической механики**

- В декартовой системе координат положение материальной точки характеризуется радиусом - вектором

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

- Кинематическое уравнение движения материальной точки

$$\vec{r} = \vec{r}(t)$$

- Средняя скорость движения материальной точки

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

- Мгновенная скорость движения материальной точки

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

- Среднее ускорение переменного движения

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

- Мгновенное ускорение переменного движения

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

- Тангенциальная составляющая ускорения при криволинейном движении

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}$$

- Нормальная составляющая ускорения при криволинейном движении

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

- Полное ускорение при криволинейном движении

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n, \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$$

- Кинематическое уравнение материальной точки, вращающейся вокруг неподвижной оси по окружности радиусом  $R$

$$\varphi = f(t)$$

- а) равномерное вращательное движение

угловая скорость  $\omega = const$

угол поворота  $\Delta\varphi = \omega t$

- б) равноускоренное вращательное движение:

угловое ускорение  $\varepsilon = const \succ 0$

угловая скорость  $\omega = \omega_0 + \varepsilon t,$

- угол поворота  $\Delta\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$
- в) равнозамедленное вращательное движение
- угловое ускорение  $\omega = const < 0$
- угловая скорость  $\omega = \omega_0 - \varepsilon t$

угол поворота  $\Delta\varphi = \omega_0 t - \frac{\varepsilon t^2}{2}$

- Угловая скорость

$$\bar{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\bar{\varphi}}{dt}$$

- Угловое ускорение

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\bar{\omega}}{dt}$$

- Связь между линейными и угловыми величинами

$$\vec{g} = \bar{\omega} \times \vec{r}; \quad g = \omega \cdot r \sin \alpha; \quad a_\tau = R\varepsilon;$$

$$a_\tau = \frac{dg}{dt} = \frac{d(\omega R)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon;$$

$$a_n = \omega^2 R; \quad a_n = \frac{g^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R$$

- здесь:  $R$  – радиус окружности  $g$  – линейная скорость  
 $a_\tau$  – тангенциальное ускорение  $\omega$  – угловая скорость  
 $a_n$  – нормальное ускорение  $\varepsilon$  – угловое ускорение

- Принцип суперпозиции сил

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$$

- Импульс (количество движения) материальной точки

$$\vec{p} = m\vec{g}$$

- Второй закон Ньютона (основной закон динамики поступательного движения):

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{или} \quad \vec{F} dt = d\vec{p}$$

где  $\vec{F}$  – равнодействующая сила

$\vec{F} dt$  – импульс силы,  $d\vec{p}$  – изменение импульса материальной точки

- Виды сил в механике:

- а) сила тяжести

$$F_a = mg$$

- б) сила всемирного тяготения

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$  – гравитационная постоянная,  $m_1, m_2$  – массы взаимодействующих тел,  $r$  – расстояние между взаимодействующими телами (тела рассматриваются как материальные точки)

в) сила упругости

$$F_c = -kx$$

в) сила трения (трение скольжения)

$$F_{\text{тск}} = \mu N$$

• Закон сохранения импульса для замкнутой системы

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N m_i \vec{v}_i = \text{const}$$

• Для двух тел в замкнутой системе (абсолютно упругий удар)

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2$$

• Работа, совершаемая переменной силой на пути  $S$

$$A = \int_1^2 F \cos \alpha ds = \int_1^2 F_s ds$$

• Мгновенная мощность

$$N = \frac{\vec{F} d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \vec{v} = F v \cos \alpha$$

• Кинетическая энергия тела при поступательном движении

$$W_k = \int_0^v m v dv = \frac{mv^2}{2}$$

• Потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли на высоту  $h$

$$W_n = mgh$$

где  $g$  – ускорение свободного падения

• Потенциальная энергия упругодеформированного тела

$$W_n = \frac{kx^2}{2}$$

• Полная механическая энергия системы

$$W = W_k + W_n$$

• Закон сохранения механической энергии (для консервативной системы)

$$W = W_k + W_n = \text{const}$$

• Скорость двух тел массами  $m_1$  и  $m_2$  после прямого абсолютно упругого центрального удара

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

$\vec{v}_1$  – скорость тела массой  $m_1$  до удара

$\vec{v}'_1$  - скорость тела массой  $m_1$  после удара

$\vec{v}_2$  - скорость тела массой  $m_2$  до удара

$\vec{v}'_2$  - скорость тела массой  $m_2$  после удара

- Скорость движения тел после абсолютно неупругого центрального удара

$$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

- Основное уравнение (закон) динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси

$$M_z = J_z \varepsilon, \quad \vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

- Момент инерции системы (тела)

$$J_z = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$$

### Момент инерции тел правильной геометрической формы

(тела считаются однородными;  $m$  – масса тела)

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом $R$	Ось симметрии	$J = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиусом $R$	Ось симметрии	$J = \frac{1}{2} mR^2$
Шар радиусом $R$	Ось проходит через центр шара	$J = \frac{2}{5} mR^2$
Тонкостенная сфера радиусом $R$	Ось проходит через центр сферы	$J = \frac{2}{3} mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной $l$	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину	$J = \frac{1}{12} ml^2$
Прямой тонкий стержень длиной $l$	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец	$J = \frac{1}{3} ml^2$

- Теорема Штейнера

$$J = J_c + ma^2$$

- Кинетическая энергия вращающегося тела

$$W_{\text{кин}} = \frac{J_z \omega^2}{2}$$

- Момент силы и модуль вектора момента силы относительно неподвижной оси  $O$

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{F}], \quad M = F r \sin \alpha = F l$$

- Момент силы относительно неподвижной точки

$$\vec{M}_z = [\vec{r} \vec{F}]_z$$

- Момент импульса материальной точки относительно неподвижной точки

$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i \vec{p}_i] = [\vec{r}_i m_i \vec{v}_i]$$

- Момент импульса твердого тела относительно оси вращения

$$L_z = \sum_{i=1}^N m_i v_i r_i = J_z \omega$$

- Закон сохранения момента импульса для замкнутой системы

$$J_z \omega = const$$

- Закон сохранения момента импульса для двух тел в замкнутой системе

$$J_1 \omega_1 + J_2 \omega_2 = J_1 \omega'_1 + J_2 \omega'_2$$

- Кинематическое уравнение гармонических колебаний

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

где  $x$  - смещение колеблющейся тела от положения равновесия

$A$  - амплитуда – максимальное смещение от положения равновесия

$\omega_0$  - круговая (циклическая) частота – число колебаний за  $2\pi$  секунды

$(\omega_0 t + \varphi_0)$  – фаза – определяет положение тела в любой момент времени

$\varphi_0$  - начальная фаза – определяет положение тела при  $t=0$

- Скорость точки, совершающей гармонические колебания

$$v = \frac{dx}{dt} = -A \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- Ускорение точки, совершающей гармонические колебания

$$a = \frac{dv}{dt} = -A \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- Сила, действующая на колеблющуюся материальную точку

$$F = -m \omega^2 x$$

- Кинетическая энергия точки, совершающей гармонические колебания

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2 \omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- Потенциальная энергия точки, совершающей гармонические колебания

$$W_n = \frac{mA^2 \omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- Полная механическая энергия

$$W = W_k + W_n = \frac{mA^2 \omega_0^2}{2}$$

- Период колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

- Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

- Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

- Сложение двух гармонических колебаний одинакового направления и одинаковой частоты

- а) амплитуда результирующего колебания

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

- б) начальная фаза результирующего колебания

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

- в) уравнение результирующего колебания

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- Уравнение траектории движения точки, участвующей в двух взаимно перпендикулярных колебаниях  $x = A \cos \omega t$  и  $y = B \cos(\omega t + \varphi)$  одинаковой частоты ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ )

- а)  $y = \frac{A_2}{A_1} x$  при разности фаз  $\varphi = 0$

- б)  $y = -\frac{A_2}{A_1} x$  при разности фаз  $\varphi = \pm \pi$

- в)  $\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1$  при разности фаз  $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$

- Уравнение плоской бегущей волны

$$y = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

где  $y$  – смещение точек среды с координатой  $x$  в момент времени  $t$   
 $v$  – скорость распространения волны

- Разность фаз, лежащих на луче двух точек

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$$

где:  $\Delta x$  – расстояние между этими точками  
 $\lambda$  – длина волны

## Механика жидкостей и газов.

- Давление. Закон Паскаля.

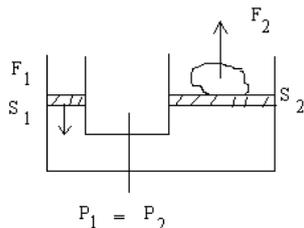
$$P = \frac{F}{S};$$

$F$  – сила давления,  $S$  – площадь поверхности. [1Па = 1Н/1 м<sup>2</sup>]

$$P = \frac{\rho v g}{S} = \frac{\rho S h g}{S} = \rho g h$$

$h$  – высота уровня жидкости.

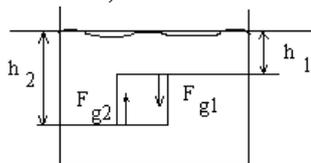
- Сообщающиеся сосуды.



$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

- Архимедова сила. Атмосферное давление

$$m = \rho g; \quad F_A = \rho_{жс} g v$$



$$F_A \geq mg - \text{плавает}$$

$$F_A < mg - \text{тонет}$$

$$\rho_{жс} \geq \rho_{тела} - \text{плавает}$$

$$\rho_{жс} < \rho_{тела} - \text{тонет}$$

## 2. Основы молекулярной физики и термодинамики

- Молярная масса

$$M = m_0 N_A$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы,  $N_A$  – постоянная Авогадро.

- Молярный объем  $V_m = \frac{V}{\nu}$

$V$  – объем однородной массы;  $\nu = \frac{m}{M}$  – количество вещества

- Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона - Менделеева)

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

- Закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс)

$$pV = \text{const} \quad (T = \text{const}, \quad m = \text{const})$$

- Закон Гей - Люссака (изобарный процесс)

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (p = \text{const}, \quad m = \text{const})$$

- Закон Шарля (изохорный процесс)

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (V = \text{const}, \quad m = \text{const})$$

- Закон Дальтона для давления смеси  $n$  идеальных газов

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \quad \text{или} \quad p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n,$$

где  $p_i$  – парциальное давление  $i$ -го компонента,

$n$  – число компонентов составляющих смесь газа .

- Количество вещества смеси газов

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \frac{N_3}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A}$$

или

$$\nu = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \frac{m_3}{M_3} + \dots + \frac{m_n}{M_n}$$

где  $\nu_i, N_i, m_i, M_i$  – соответственно количество вещества компонентов газа, число молекул, масса и молярная масса.

- Молярная масса смеси газов

$$M = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots + \nu_n}$$

где  $V_i, m_i$  – количество вещества и масса компонентов смеси газа.

- Массовая доля компонента смеси газов (в долях или %)

$$w = \frac{m_i}{m}$$

где  $m_i$  – масса компонента газа,  $m$  – масса смеси газов.

- Концентрация молекул  $n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{M}$

где  $N$  – число молекул в заданной системе,  $\rho$  – плотность вещества,  $V$  – объем системы,  $N_A$  – постоянная Авогадро .

- Основное уравнение молекулярно- кинетической теории идеальных газов  $p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{кс}^2 \rangle$

- Зависимость давления идеального газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT$$

- Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа  $\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{3}{2} k T$

- Средняя энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} k T$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы .

- Скорости молекул

$$\langle v_{кс} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \text{ – средняя квадратичная}$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \text{ – средняя арифметическая}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \text{ – наиболее вероятная}$$

- Удельные теплоемкости идеального газа при постоянном объеме и постоянном давлении

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}, \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}$$

- Связь между удельной и молярной теплоемкостями

$$c = \frac{C_m}{M}, \quad C_m = c \cdot M$$

• Уравнение Майера  $C_p = C_v + R$

• Внутренняя энергия идеального газа  $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} \nu RT$

• Первое начало термодинамики  $Q = \Delta U + A$

• Элементарная работа газа при изменении его объема  
 $dA = p dV$

• Изменение внутренней энергии идеального газа

$$dU = \frac{m}{V} C_v dT$$

• Работа идеального газа:

- при изобарном процессе

$$A = p(V_2 - V_1), \quad A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

- при изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

- при адиабатном процессе  $A = \frac{m}{M} C_v (T_1 - T_2)$

• Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = const, \quad TV^{\gamma-1} = const, \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = const$$

где  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$  — показатель адиабаты.

• Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

• Термический коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

• Неравенство Клаузиуса

$$\Delta S \geq 0$$

• Изменение энтропии при равновесном переходе системы из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \frac{m}{M} \left( C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right)$$

• Уравнение Ван-дер Ваальса для реального газа

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

где  $a$  и  $b$  - постоянные Ван-дер-Ваальса, различные для разных газов.

- Связь критических параметров (объем, давление и температура ) с постоянными Ван-дер-Ваальса

$$V_{кр} = 3b, \quad p_{кр} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{кр} = \frac{8a}{27Rb}$$

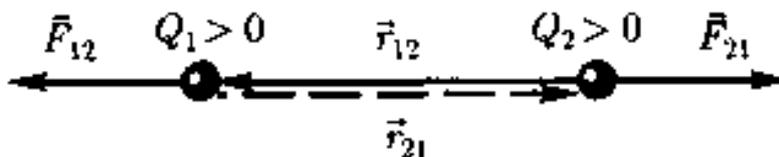
- Внутренняя энергия реального газа

$$U_m = \frac{m}{M} \left( C_v T - \frac{a}{V_m} \right)$$

- Энтальпия системы  $U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2$

### 3.Электростатика. Постоянный электрический ток

- Закон Кулона



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

где  $F$  – сила взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ ,  
 $r$  - расстояние между зарядами,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,  
 $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды.

- Напряженность электрстатического поля

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

- Поток вектора напряженности электрстатического поля  $\vec{E}$

$d\Phi_E = \vec{E} d\vec{S} = E_n dS$  - сквозь элементарную площадку  $dS$

$\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_S E_n dS$  - сквозь поверхность  $S$

$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS$  - сквозь замкнутую поверхность  $S$

- Теорема Гаусса для электрстатического поля в вакууме
- а) в случае дискретного распределения

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$

- б) в случае непрерывного распределения зарядов

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

- Плотность зарядов (линейная, поверхностная, объемная)

$$\tau = \frac{dq}{dl}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}, \quad \rho = \frac{dq}{dV}$$

- Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

- Напряженность поля, создаваемого двумя бесконечными параллельными разноименно заряженными плоскостями

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

- Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом  $R$  с общим зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от центра сферы

$$E = 0, \text{ при } r < R \quad (\text{внутри сферы})$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, \text{ при } r > R \quad (\text{вне сферы})$$

- Напряженность поля, создаваемого объемно заряженным шаром радиусом  $R$  на расстоянии  $r$  от центра шара

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r, \text{ при } r < R \quad (\text{внутри шара})$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, \text{ при } r > R \quad (\text{вне шара})$$

- Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль замкнутого контура

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_l dl = 0$$

- Потенциал электростатического поля

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0}, \quad \varphi = \frac{A_\infty}{q_0}$$

- Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля

$$\vec{E} = -grad\varphi, \quad \vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right)$$

- Разность потенциалов между точками, находящимися на расстоянии  $x_1$  и  $x_2$  от равномерно заряженной бесконечной плоскости

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (x_2 - x_1)$$

- Разность потенциалов между бесконечными разноименно заряженными плоскостями, расстояние между которыми равно  $d$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\epsilon_0} dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d.$$

- Поляризованность диэлектрика

$$\vec{P} = \frac{\vec{P}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{P}_i}{V}$$

- Связь между поляризованностью диэлектрика и напряженностью электростатического поля

$$\vec{P} = \chi\epsilon_0\vec{E}$$

- Связь диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  с диэлектрической восприимчивостью  $\chi$

$$\epsilon = 1 + \chi$$

· Связь между напряженностью  $\vec{E}_0$  внешнего поля и напряженностью поля в диэлектрике  $\vec{E}$

$$E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0}, \quad E = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

· Связь между векторами электрического смещения  $\vec{D}$ , напряженности электростатического поля  $\vec{E}$  и поляризованностью  $\vec{P}$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

· Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

$$\oint_S \vec{D} \, d\vec{S} = \oint_S D_n \, dS = \sum_{i=1}^N q_i$$

· Электрическая емкость уединенного проводника

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

· Электрическая емкость шара радиусом  $R$

$$C = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon R$$

· Электрическая емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}$$

где  $d$  – расстояние между пластинами конденсатора,  $S$  – площадь каждой пластины.

· Электрическая емкость сферического конденсатора

$$C = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы концентрических сфер.

· Электрическая емкость цилиндрического конденсатора

$$C = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon \frac{l}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы полых коаксиальных цилиндров,  $l$  – длина пластин конденсатора.

· Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками конденсатора

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2 S}{2}$$

· Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

· Энергия электростатического поля плоского конденсатора

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} S d = \frac{\varepsilon \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V$$

- Объемная плотность энергии электростатического поля

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}$$

- Сила тока  $I = \frac{dq}{dt}, \quad I = \frac{q}{t}$

- Плотность тока в проводнике

$$j = \frac{I}{S}, \quad \vec{j} = ne\vec{v}$$

- Законы Ома

$$I = \frac{U}{R} \text{ — для однородного участка цепи}$$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R} \text{ — для неоднородного участка цепи}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \text{ — для замкнутой цепи}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \text{ — в дифференциальной форме}$$

- Сопротивление  $R$  однородного линейного проводника, проводимость  $G$  проводника и удельная электрическая проводимость  $\gamma$

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad G = \frac{1}{R}, \quad \gamma = \frac{1}{\rho}$$

- Зависимость удельного сопротивления и сопротивления проводника от температуры

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad \rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

где  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления ;

$R$  и  $R_0$  - сопротивление проводника при температуре  $t^\circ$  и  $t=0^\circ\text{C}$  ;

$\rho$  и  $\rho_0$  - удельное сопротивление проводника при температуре  $t^\circ$  и  $t=0^\circ\text{C}$

- Работа тока

$$dA = U dq = IU dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$$

- Мощность тока

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

- Закон Джоуля-Ленца

$$dQ = IU dt = I^2 R dt$$

- Первое правило Кирхгофа

$$\sum_k I_k = 0$$

· Второе правило Кирхгофа

$$\sum_{i=1}^m I_i R_i = \sum_{k=1}^n \mathcal{E}_k$$

### Параллельное и последовательное соединение проводников

Соединение	последовательно	параллельно
Постоянная величина	$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I$ $I = const$	$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n = U$ $U = const$
Суммарная величина	$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$	$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$
Полное сопротивление	$R = \sum_{i=1}^n R_i$	$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$

#### 4. Магнитное поле. Электрмагнитная индукция

- Магнитный момент контура с током

$$\vec{p}_m = I S \vec{n}, \quad p_m = I S$$

где  $S$  – площадь контура стоком;  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности контура.

- Механический момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}], \quad M = p_m B \sin \alpha$$

где  $\vec{B}$  – магнитная индукция;  $\alpha$  – угол между нормалью к плоскости контура с током.

- Связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды. Для вакуума  $\mu = 1$ .

- Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad dB = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

где  $d\vec{B}$  – магнитная индукция поля, создаваемая элементом длиной  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$ ;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от  $d\vec{l}$  к точке, в которой определяется магнитная индукция;  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

- Магнитная индукция в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}$$

где  $R$  – радиус проводника.

- Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi R}$$

- Закон Ампера

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}], \quad dF = I B dl \sin \alpha$$

где  $d\vec{F}$  – сила, действующая на элемент длиной  $d\vec{l}$  проводника с током, помещенный в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ ;  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$ .

· Сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v} \vec{B}], \quad F = qvB \sin \alpha$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$ ;  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .

· Формула Лоренца

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \vec{B}]$$

где  $\vec{F}$  – результирующая сила, действующая на движущийся заряд, если на него действуют электрическое и магнитное поля.

· Закон полного тока для магнитного поля в вакууме (теорема о циркуляции вектора  $\vec{B}$ )

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k$$

мундагы  $B_l = B \cos \alpha$  – составляющая вектора  $\vec{B}$  в направлении касательной контура  $L$  произвольной формы;

$\sum_{k=1}^N I_k$  – алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром;

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{l}$

· Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме)

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

где  $I$  – сила тока,  $N$  – число витков соленоида;  $l$  – длина соленоида.

· Магнитная индукция поля внутри тороида(в вакууме)

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r}$$

где  $I$  – сила тока в тороиде,  $N$  – число витков тороида;  $r$  – внутренний радиус тороида.

· Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток)

а) для однородного поля и плоской поверхности

$$\Phi_B = BS \cos \alpha = B_n dS$$

где  $S$  – площадь контура,  $\alpha$  – угол между нормалью и вектором  $\vec{B}$ .

б) для неоднородного поля и произвольной поверхности

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} dS = \int_S B_n dS$$

- Элементарная работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = Id\Phi$$

- Закон Фарадея для электромагнитной индукции

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- Э.д.с. самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}$$

где  $L$  – индуктивность контура.

- Индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 \mu n^2 V = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}$$

где  $n = \frac{N}{l}$  – число витков на единицу длины;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $l$  – длина соленоида.

- Сила тока при размыкании цепи, содержащей источник тока, резистор сопротивлением  $R$  и катушку индуктивностью  $L$  (экстраток)

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Сила тока при замыкании цепи, содержащей источник тока, резистор сопротивлением  $R$  и катушку индуктивностью  $L$  (экстраток)

$$I = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

где  $I_0$  – установившаяся сила тока;  $\tau = \frac{L}{R}$  – время релаксации.

- Взаимная индуктивность двух катушек с числом витков  $N_1$  и  $N_2$ , намотанных на общий тороидальный сердечник

$$L_{12} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S$$

где  $l$  – длина сердечника по средней линии.

- Коэффициент трансформации

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

где  $N, \varepsilon, I$  – число витков, э.д.с. и сила тока в обмотках трансформатора.

· Энергия магнитного поля, создаваемая током в замкнутом контуре индуктивностью  $L$ , по которому течет ток

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

· Объемная плотность энергии однородного магнитного поля длинного соленоида

$$w = \frac{W}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2}$$

## 5. Электромагнитные колебания и волны

- Собственная частота колебательного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

здесь  $L$  – индуктивность катушки,  $C$  – электрическая емкость конденсатора.

- Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний заряда в контуре и его решение

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0, \quad q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

где  $q_m$  – амплитуда колебаний заряда конденсатора,  $\omega_0$  – собственная частота контура

- Формула Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

- Сила тока в колебательном контуре и напряжение на конденсаторе в случае гармонических электромагнитных колебаний

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

где  $I_m = \omega_0 q_m$  – амплитуда силы тока,  $U_m = \frac{q_m}{C}$  – амплитуда напряжения.

- Дифференциальное уравнение свободных затухающих в контуре и его решение

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad q = q_m e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi)$$

где  $q_m e^{-\delta t}$  – амплитуда затухающих колебаний заряда конденсатора,  $q_m$  – начальная амплитуда,

$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$  – частота затухающих колебаний.

- Добротность колебательного контура

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- Дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний и его решение

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t, \quad q = q_m \cos(\omega t - \alpha)$$

где

$$q_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$\alpha$  – сдвиг по фазе между зарядом и приложенным напряжением

$$U = U_m \cos \omega t$$

$R, L, C$  - соответственно активное сопротивление, индуктивность и емкость колебательного контура.

• Резонансная частота и резонансная амплитуда заряда в случае электрического резонанса

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}, \quad (q_m)_{рез} = \frac{U_m / L}{2\delta \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$$

• Резонансная частота и резонансная амплитуда силы тока в случае электрического резонанса

$$\omega_{рез} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (I_m)_{рез} = \frac{U_m}{R}$$

где  $\omega_0$  – собственная частота контура,  $U_m$  – амплитуда внешнего приложенного напряжения.

• Полное сопротивление цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные резистор сопротивлением  $R$ , катушку индуктивностью  $L$  и конденсатор емкостью  $C$

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

• Действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

• Средняя мощность, выделяемая в цепи переменного тока

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$$

• Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}$$

• Фазовая скорость распространения электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$  – скорость распространения света в вакууме;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

• Связь между мгновенными значениями напряженностей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей электромагнитной волны

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H$$

• Уравнение плоской электромагнитной волны

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - k x + \varphi), \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - k x + \varphi)$$

где  $\vec{E}_0$  – амплитуда напряженности электрического поля;

$\vec{H}_0$  – амплитуда напряженности магнитного поля;  $k = \frac{\omega}{v}$  – волновое число;  $\varphi$  – начальная фаза колебаний в точке с координатой  $x = 0$ .

• Объемная плотность энергии электромагнитного поля

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

• Вектор плотности потока электромагнитной волны – вектор Умова-Пойтинга

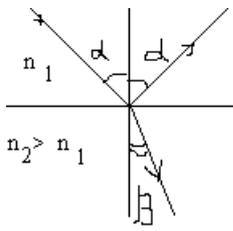
$$\vec{S} = [\vec{E} \vec{H}]$$

• Модуль плотности потока энергии

$$S = w v = E H$$

## 6. Оптика. Элементы атомной и ядерной физики

- Закон преломления



$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}; \quad n = \frac{c}{v}$$

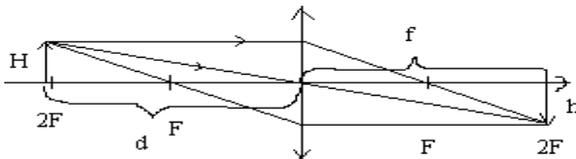
$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}; \quad n_{21} = \frac{n_2}{n_1}; \quad V_{\text{среды}} = \frac{m}{c};$$

$$n_{\text{в-ва}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в-в}}}$$

$n_{21}$  - относит. показатель преломления.

$v_1, v_2$  - скорости света в 1-й и второй средах.

- Линзы



$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

$$k = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}$$

$d$  – расстояние предмета от линзы

$f$  – расстояние от изображения до предмета

$F$  – фокус

$D$  – оптическая сила линзы [диоптрии]

$k$  - увеличение линзы

- Оптическая длина пути

$$L = nS$$

где  $S$  – геометрическая длина пути световой волны в среде

$n$  – показатель преломления этой среды.

- Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1$$

- Разность фаз двух когерентных волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме.

- Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm m \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

- Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

- Ширина интерференционной полосы

$$b = \frac{l}{d} \lambda_0$$

где  $d$  – расстояние между когерентными источниками, находящимися на расстоянии  $l$  от экрана ( $l \gg d$ ).

- Условие максимумов и минимумов при интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей плоскопараллельной пленки, находящейся в воздухе

$$2 d n \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2 d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = m \lambda_0$$

$$2 d n \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2 d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda_0$$

где  $d$  – толщина пленки,  $n$  – ее показатель преломления,  $i$  – угол падения,  $r$  – угол преломления ( $m = 0, 1, 2, \dots$ )

- Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{\left( m - \frac{1}{2} \right) \lambda_0 R}$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$  – номер кольца,  $R$  – радиус кривизны линзы,  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме.

- Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{m \lambda_0 R}$$

- Радиус внешней границы  $m$  – й зоны Френеля для сферической волны

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

где  $m$  – номер зоны Френеля,  $a$  – расстояние диафрагмы с круглым отверстием от точечного источника,  $b$  – расстояние диафрагмы с круглым отверстием от экрана.

- Радиус внешней границы  $m$  – й зоны Френеля для плоской волны

$$r_m = \sqrt{b m \lambda}$$

- Период дифракционной решетки

$$d = a + b, \quad d = \frac{1}{N_0}$$

где  $a$  – ширина каждой щели решетки,  $b$  – ширина непрозрачных участков между щелями,  $N_0$  – число щелей, приходящихся на единицу длины дифракционной решетки.

- Условие главных максимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda. \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

- Формула Вульфа-Брэггов (условие дифракционных максимумов от пространственной дифракционной решетки)

$$2d \sin \vartheta = \pm m \lambda. \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

где  $d$  – расстояние между атомными плоскостями кристалла,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения,  $\vartheta$  – угол скольжения.

- Угловая дисперсия дифракционной решетки

$$D = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

где  $\varphi$  – угол дифракции,  $d$  – период дифракционной решетки,  $m$  – порядок спектра.

- Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R_{\text{дифр}} = m N \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

где  $m$  – порядок спектра,  $N$  – общее число штрихов решетки.

- Закон Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

где  $I_0$  – интенсивность света падающего на анализатор,  $I$  – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор,  $\alpha$  – угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

- Степень поляризации света

$$P = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}$$

где  $I_{\text{max}}$  и  $I_{\text{min}}$  – соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

- Закон Брюстера

$$t \tan i_B = n_{21}$$

$i_B$  – угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоскополяризованным,  $n_{21}$  – относительный показатель преломления среды.

- Угол поворота плоскости поляризации

а) для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha d$$

б) для оптически активных

$$\varphi = [\alpha] C d$$

где  $\alpha$  – удельное вращение,  $d$  – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе,  $[\alpha]$  – удельное вращение,  $C$  – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

- Закон Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma T^4$$

где  $R_e$  – энергетическая светимость абсолютно черного тела,  
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана,  
 $T$  – термодинамическая температура.

- Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м·К – постоянная Вина,  $\lambda_{\max}$  – длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела.

- Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина волны,  $\nu$  – частота.

- Импульс фотона

$$p = mc = \frac{h}{\lambda}$$

- Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2} \quad \text{или} \quad h\nu = h\nu_0 + eU_0$$

где  $h\nu$  – энергия фотона падающего на поверхность металла,  
 $A$  – работа выхода электрона из металла,  $\frac{m\nu_{\max}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона,  $U_0$  – задерживающее напряжение.

- Красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A}{h}$$

где  $\nu_0$  – минимальная частота, при которой фотоэффект еще возможен ( $\lambda_0$  – соответственно максимальная длина волны).

- Изменение длины волны излучения при комптоновском рассеянии (комптоновский сдвиг)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \vartheta) = \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{\vartheta}{2} = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\vartheta}{2}$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения,  $m$  – масса покоя электрона,  $\lambda'$  – длина волны рассеянного излучения,  $\vartheta$  – угол рассеяния,  $\lambda_c = \frac{h}{m c}$  – комптоновская длина волны ( $\lambda_c = 2,43$  пм).

- Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho)$$

где  $E_e = N h \nu$  – облученность поверхности,  $\rho$  – коэффициент отражения,  $w$  – объемная плотность энергии излучения.

- Обобщенная формула Бальмера, описывающая серии в спектре излучения атома водорода

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $\nu$  – частота спектральных линий в спектре атома водорода,  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  и  $R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга,  $m$  – определяет серию ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ),  $n$  – определяет отдельные линии соответствующей серии ( $n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots$ ).

$m=1$  - серия Лаймана,  $m=2$  - серия Бальмера,  $m=3$  - серия Пашена,  $m=4$  - серия Брэккета,  $m=5$  - серия Пфунда,  $m=6$  - серия Хэмфри.

- Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)

$$m_e v_n r_n = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

где  $m_e$  – масса электрона,  $v_n$  – скорость электрона по  $n$ -й орбите радиусом  $r_n$ .

- Второй постулат Бора (правило частот)

$$h \nu = E_n - E_m$$

где  $E_n$  и  $E_m$  – энергии стационарных состояний атома соответственно до и после излучения (поглощения).

- Радиус  $n$ -й стационарной орбиты в боровской модели атома водорода

$$r_n = \frac{\hbar^2 \cdot 4 \pi \varepsilon_0}{m_e e^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

- Первый боровский радиус

$$r_1 = a \approx 52,8 \text{ пм.}$$

- Длина волны де- Бройля  $\lambda = \frac{h}{p}$

- Для нерелятивистской частицы

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}, \quad p = m_0 v = \sqrt{2m_0 T}, \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 T}}$$

- Для релятивистской частицы

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad p = m v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \lambda = \frac{h c}{\sqrt{T(T + 2m_0 c^2)}}$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы,  $m$  – релятивистская масса,  $v$  – скорость частицы,  $T$  – кинетическая энергия,  $E_0 = m_0 c^2$  – энергия покоя частицы,  $c$  – скорость распространения света в вакууме.

- Массовое число ядра атома (число нуклонов в ядре)

$$A = Z + N$$

где  $Z$  – зарядовое число (число протонов),  $N$  – число нейтронов.

- Радиус ядра атома

$$R = R_0 A^{1/3}$$

где  $R_0 = (1,3 - 1,7)$  фм;  $A$  – массовое число.

- Дефект массы ядра

$$\Delta m = [Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}]$$

где  $m_p$  – масса протона,  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_{\text{я}}$  – масса ядра.

- Энергия связи ядра атома

$$E_B = [Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}] c^2$$

где  $c$  – скорость распространения света в вакууме,  $m_p$  – масса протона,  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_{\text{я}}$  – масса ядра.

- Дефект массы ядра выражен в атомных единицах массы (а.е.м.)

$$E_B = 931 \cdot \Delta m$$

где 931 – коэффициент пропорциональности (1 а.е.м.  $\approx$  931 МэВ),  $[E] = \text{МэВ}$ .

- Удельная энергия связи

$$\delta E = \frac{E_B}{A}$$

- Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

где  $N$  – число нераспавшихся ядер к моменту времени  $t$ ,  $N_0$  – начальное число нераспавшихся ядер ( $t=0$ ).

- Период полураспада

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

где  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада

- Среднее время жизни радиоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- Число атомов радиоактивного изотопа

$$N = \frac{m}{M} N_A$$

где  $M$  - молярная масса,  $N_A$  - постоянная Авогадро.

- Активность нуклида

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N, \quad A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

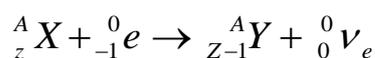
где  $N$  - число нераспавшихся ядер к моменту времени  $t$ ,  $A_0$  - активность изотопа в начальный момент времени ( $t=0$ ).

- Правила смещения



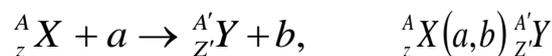
где  ${}_Z^A X$  - материнское ядро,  $Y$  - символ дочернего ядра,  ${}_{-1}^0 e$  - символическое обозначение электрона (зарядовое число равно -1, массовое число - нулю),  ${}_{+1}^0 e$  - символическое обозначение позитрона (зарядовое число равно +1, а массовое число - нулю),  ${}_2^4 He$  - ядро гелия ( $\alpha$  - частица).

- Схема электронного захвата



здесь  ${}_0^0 \nu_e$  - нейтрино.

- Символическая запись ядерной реакции



где  ${}_Z^A X$  - зарядовое число  $Z$ , массовое число  $A$  исходного ядра,  ${}_{Z'}^{A'} Y$  - зарядовое число  $Z'$ , массовое число  $A'$  конечного ядра,  $a$  - бомбардирующая частица,  $b$  - испускаемая частица.

- Энергия ядерной реакции

$$Q = [(m_X + m_a) - (m_Y + m_b)] c^2$$

где  $(m_X + m_a)$  - сумма масс ядра-мишени и бомбардирующей частицы,  $(m_Y + m_b)$  - сумма масс покоя ядер продуктов реакции.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. Введение .....	5
Измерение физических величин и математическая обработка результатов измерений.....	8
1. Точность измерений и типы ошибок. ....	8
2. Методы обработки результатов измерений, содержащих случайные ошибки. ....	10
3. Оценка точности результатов при техническом измерении и использовании табличных данных.....	12
4. Порядок обработки результатов прямых измерений. ....	13
5. Порядок обработки результатов косвенных измерений. ....	15
6. Правила вычисления погрешностей. ....	16
7. Правила построения графика. ....	17
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	19
Рекомендации для выполняющих работы. ....	20
№ 1 Изучение движения тел при наличии сил вязкого трения .....	21
№ 2 Определение момента инерции однородного диска методом колебаний.....	26
№ 4 Изучение резонанса пружинного маятника.....	30
№ 8 Распределение молекул по скоростям .....	38
№ 10 Изучение фазового перехода порядок – беспорядок .....	40
№ 11 Изучение электростатического поля .....	43
№ 12 Измерение элементарного заряда .....	45
№ 14 Изучение лампового диода .....	49
№ 15 Изучение намагниченности парамагнетиков .....	55
№ 16 Изучение дифракции Фраунгофера на щели .....	58
№ 17 Изучение зависимости показателя преломления призмы от длины волны .....	61
№ 18 Изучение фотоэффекта .....	64
№ 21 Изучение зависимости сопротивления реальных проводников от их геометрических параметров и удельных сопротивлений материалов.....	69
№ 22 Исследование сопротивлений проводников при параллельном и последовательном соединении .....	72
№ 23 ЭДС и внутреннее сопротивление источников постоянного тока. Закон Ома для полной цепи.....	76
№ 24 Исследование сложных цепей постоянного электрического тока	79
№ 25 Мощность в цепи постоянного тока .....	84
№ 26 Принципы работы плавких предохранителей в электрических цепях ....	87
№ 27 Элементы цепей переменного тока. Емкостное и индуктивное сопротивления, их зависимость от частоты переменного тока и параметров элементов .....	90

№ 28 Явление резонанса в цепи переменного тока .....	95
№ 1.0.1. Измерение размеров малых тел.....	99
№ 1.0.5. Измерение выталкивающей силы .....	101
№ 1.0.6. Выяснение условий равновесия рычага.....	103
№ 1.0.7. Изучение равноускоренного движения.....	105
№ 1.0.8. Изучение колебаний нитяного маятника .....	107
№ 1.0.9. Изучение явления теплообмена.....	109
№ 1.10. Изучение закона Ома.....	112
№ 1.11.Изучение свойств собирающей линзы. ....	116
3. СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	118
3.1. Электрический ток и электродвижущая сила.....	118
3.2. Закон Ома для участка цепи.....	118
3.3. Последовательное и параллельное соединение проводников...	119
3.4. Работа и мощность постоянного электрического тока.....	120
3.5. Внутреннее сопротивление источника тока.....	120
3.6. Закон Ома для полной цепи.....	120
3.7. Конденсатор. Электрическая емкость.....	120
3.8. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов.	121
3.9. Самоиндукция. Индуктивность проводника.....	121
3.10. Переменный электрический ток.....	122
3.11. Последовательная цепь переменного тока.....	123
3.12. Параллельная цепь переменного тока.....	123
3.13. Мощность в цепи переменного тока.....	124
3.14. Электроизмерительные приборы.....	124
3.15. Характеристика деталей электрических схем и их маркировка	125
Глоссарий.....	128
Темы практических занятий .....	129
Литература.....	131
Приложение 1	
1. КРАТКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ.....	132
1.1. Назначение и общие особенности программы.....	132
1.2. Технические требования к оборудованию.....	133
1.3. Содержание рабочего окна и основные принципы работы с ком- плексом.....	133
1.4. Цифровой мультиметр.....	139
1.5. Двухканальный осциллограф.....	142
Приложение 2	
1. Физические основы классической механики.....	145
2. Основы молекулярной физики и термодинамики.....	152
3. Электростатика. Постоянный электрический ток.....	156
4. Магнитное поле. Электримагнитная индукция.....	161
5. Электромагнитные колебания и волны.....	165
6. Оптика. Элементы атомной и ядерной физики .....	168

Абельдина Жайдары Калтаевна  
**Введение в виртуальную физику**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Подписано к печати 06.09.2012  
Объем 11,06 уч. изд. л.

Формат 60x84/16 Тираж 500 экз.  
Заказ № 0114 Цена договорная

---

Отпечатано в типографии ТОО «Мастер ПО»  
г. Астана, ул. Пушкина, 15-76 (ул. Кенесары, 93-76)  
тел. 8(7172)274-072 e-mail: [masterpo08@mail.ru](mailto:masterpo08@mail.ru)