

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
КИРОВОГРАДСКАЯ ЛЕТНАЯ АКАДЕМИЯ
НАЦИОНАЛЬНОГО АВИАЦИОННОГО УНИВЕРСИТЕТА

**ФИЗИКА.
ПОСОБИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Кировоград 2013

УДК 530.1

ББК 22.3

Коллективом авторов:

Борота В.Г. – лаб. работы М-2; М-4.

Бурмистров А.Н. – лаб. работы Э-1; Э-3; Э-4.

Ковалев Ю.Г. – лаб. работы М-0; М-1; Т-1.

Кузьменко О.С. – предисловие; глава 1; глава 2; М-4; Э-1; Э-3; Э-4; О-2; О-3; О-5; О-6; О-7; А-1; А-2; А-5.

Фоменко В.В. – предисловие; глава 1; глава 2; М-1; М-2; М-3; М-4; Э-1; Э-3; Э-4; К-1; К-3; О-2; О-3; О-5; О-6; А-1; А-2; А-5.

Физика. Пособие для выполнения лабораторных работ / А. Н. Бурмистров, В. Г. Борота, Ю. Г. Ковалев, О. С. Кузьменко, В. В. Фоменко; сост.: О. С. Кузьменко, В. В. Фоменко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Кировоград : Изд-во КЛА НАУ, 2013. – 104 с.

Рецензенты:

Величко С.П. – доктор педагогических наук, профессор кафедры физики и методики ее преподавания Кировоградского государственного педагогического университета имени Владимира Винниченко.

Воробейчик В.Я. – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и физики Кировоградского национального технического университета.

Данное пособие предназначено для курсантов и слушателей КЛА НАУ в качестве основного руководства при подготовке и выполнению лабораторных работ по общему курсу физики. Учебное пособие включает необходимые теоретические сведения и указания к выполнению лабораторных работ, задания к проведению опытов, ход выполнения каждой из работ, контрольные вопросы для самопроверки курсантов, рекомендуемую литературу для углубленного изучения теоретического материала.

Посібник призначений для курсантів і слухачів КЛА НАУ в якості основних методичних рекомендацій при підготовці та виконанні лабораторних робіт із загального курсу фізики. Навчальний посібник включас: необхідні теоретичні відомості та вказівки до виконання лабораторних робіт, завдання до проведення дослідів, хід виконання кожної з робіт, контрольні запитання для самоперевірки курсантів, рекомендовану літературу для поглибленого вивчення теоретичного матеріалу.

Одобрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры физико-математических наук КЛА НАУ, протокол № 5 от 21 марта 2013 г.

Одобрено и рекомендовано к изданию на заседании Ученого совета КЛА НАУ, протокол № 4 от 29 апреля 2013 г.

© Бурмистров А.Н., Борота В.Г., Ковалев Ю.Г.,
Кузьменко О.С., Фоменко В.В., 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ.....	6
1.1. Предмет и задачи физического лабораторного практикума..	6
1.2. Задачи учебного физического опыта.....	7
1.3. Основные требования к подготовке и проведению опытов при выполнении лабораторных работ по физике.....	7
1.4. Оформление отчета по лабораторной работе.....	9
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ.....	11
2.1. Измерения и погрешности измерений. Общие понятия.....	11
2.2. Расчет погрешностей измерений.....	15
2.3. Графическое представление результатов эксперимента.....	18
ГЛАВА 3. РАБОТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА.....	20
<i>Лабораторная работа М-0. Простейшие измерения.....</i>	<i>20</i>
<i>Лабораторная работа М-1. Изучение законов динамики на машине Атвуда.....</i>	<i>32</i>
<i>Лабораторная работа М-2. Изучение законов вращательного движения и определение моментов инерции тел.....</i>	<i>41</i>
<i>Лабораторная работа М-3. Измерение момента инерции физического маятника.....</i>	<i>49</i>
<i>Лабораторная работа М-4. Определение коэффициента вязкости методом Стокса.....</i>	<i>53</i>
<i>Лабораторная работа Т-1. Определение коэффициента Пуассона воздуха по способу Клемана и Дезорма.....</i>	<i>60</i>
<i>Лабораторная работа Э-1. Измерение омических сопротивлений с помощью моста постоянного тока.....</i>	<i>69</i>
<i>Лабораторная работа Э-3. Определение горизонтальной составляющей земного магнитного поля с помощью тангенс-гальванометра.....</i>	<i>81</i>
<i>Лабораторная работа Э-4. Определение индуктивности катушки.....</i>	<i>87</i>
<i>Лабораторная работа К-1. Изучение свободных механических колебаний.....</i>	<i>93</i>

<i>Лабораторная работа К-3. Изучение стоячих волн и определение коэффициента Пуассона воздуха.....</i>	<i>101</i>
<i>Лабораторная работа О-2. Определение главного фокусного расстояния линзы методом Бесселя.....</i>	<i>108</i>
<i>Лабораторная работа О-3. Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа.....</i>	<i>118</i>
<i>Лабораторная работа О-5. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки.....</i>	<i>125</i>
<i>Лабораторная работа О-6. Определение концентрации сахарных растворов с помощью поляриметра.....</i>	<i>131</i>
<i>Лабораторная работа О-7. Измерение длины световой волны с помощью интерферометра Юнга.....</i>	<i>139</i>
<i>Лабораторная работа А-1. Определение постоянной Стефана-Больцмана оптическим пирометром с исчезающей нитью.....</i>	<i>146</i>
<i>Лабораторная работа А-2. Изучение линейчатых спектров и определение постоянной Ридберга.....</i>	<i>154</i>
<i>Лабораторная работа А-5. Изучение треков заряженных частиц, полученных при помощи камеры Вильсона (по готовым фотографиям).....</i>	<i>162</i>
БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.....	170

ПРЕДИСЛОВИЕ

Авиационная техника на нынешнем этапе социального и научно-технического прогресса бурно развивается и совершенствуется. На сегодня требования к авиационному специалисту становятся все более и более высокими. Авиаспециалист должен владеть соответствующей квалификацией для оперативного решения любых задач, возникающих в его профессиональной деятельности. Одной из базовых дисциплин, необходимой для глубокого овладения соответствующими специальными знаниями, является физика, которая на основе определенных модельных представлений изучает окружающий мир со всеми его явлениями, законами и закономерностями. Учебный курс физики невозможно в полной мере успешно усвоить без наглядной экспериментальной работы, что и находит свое отображение в физическом лабораторном практикуме.

Разработанный лабораторный практикум предназначен для курсантов Кировоградской летной академии Национального авиационного университета и должен рассматриваться как основное руководство при подготовке к выполнению лабораторных работ, предусмотренных программой по общему курсу физики.

Первая глава посвящена ознакомлению с порядком и правилами проведения лабораторного практикума и оформления отчета о лабораторной работе.

Вторая глава посвящена основам теории измерений и правилам расчета погрешностей измерений.

В третьей главе описаны работы лабораторного физического практикума.

Учебное пособие предназначено для курсантов и слушателей КЛА НАУ.

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

1.1 Предмет и задачи физического лабораторного практикума

Лабораторный практикум в курсе общей физики преследует три основные цели: 1) опытная иллюстрация основных теоретических положений физики; 2) ознакомление курсантов с приборами и оборудованием, которые используются для проведения измерений; 3) приобретение курсантами опыта в планировании и проведении экспериментов.

Раскроем содержание этих целей.

Демонстрация опыта часто способствует пониманию физического явления. Например, наша интуиция не подсказывает нам, что возможна интерференция света. Утверждение о том, что два пучка света могут погасить друг друга и дать темноту, с трудом принимается на веру, и для многих нужна наглядная демонстрация такого явления. Кроме того, демонстрация опытов дает представление о порядках величин. Тот факт, что интерференционные полосы, расположены очень близко друг к другу, свидетельствует о том, что длина световой волны крайне мала по сравнению с привычными размерами. Но демонстрация не может полностью заменять объяснения, основанного на соответствующих физических законах. Таким образом, первая задача практикума – иллюстрация теоретических положений – хотя и важная, но довольно ограниченная.

Вторая задача важнее. В лабораторном практикуме вы столкнетесь с такими приборами, как микрометр, электроизмерительные приборы, электронные осциллографы и т. п., и опыт работы с ними будет, несомненно, полезен. Но когда вы соприкоснетесь с практической профессиональной деятельностью авиаспециалиста, обилие приборов, с которыми предстоит работать, покажется невероятным. И ни один курс практических работ, по-видимому, не сможет научить вас пользоваться каждым из них. В ходе же лабораторных работ по физике перед вами ставится задача приобрести опыт работы с приборами вообще. У

экспериментатора, имеющего дело с приборами, должна быть особая психология, и курс лабораторных работ должен помочь вам выработать такую психологию. Правда, здесь мы соприкасаемся уже с третьей, наиболее важной из всех, задачей.

Главная задача лабораторного практикума состоит в том, чтобы научиться: 1) планировать эксперимент так, чтобы точность измерений соответствовала поставленной цели; 2) учитывать возможность систематических ошибок и принимать меры для их устранения; 3) анализировать результаты эксперимента и делать правильные выводы; 4) оценивать точность окончательного результата; 5) вести запись измерений и расчетов аккуратно, ясно и кратко.

Тщательное изучение этих вопросов и выполнение соответствующих рекомендаций позволит вам подготовиться к будущей практической и научной деятельности.

1.2 Задачи учебного физического опыта

1. Формирование представления о физическом законе в действии, объективном характере физических законов.

2. Ознакомление с основными методами физических измерений, приобретение элементарных навыков использования измерительной аппаратуры.

3. Ознакомление с наиболее распространенными измерительными приборами и с принципами их действия.

4. Приобретение навыков в обработке опытных данных и представлений о численных значениях основных физических величин.

5. Усовершенствование навыков в самостоятельной работе с научной литературой и другими источниками информации.

1.3 Основные требования к подготовке и проведению опытов при выполнении лабораторных работ по физике

При подготовке к выполнению работ лабораторного практикума следует придерживаться таких требований:

1. Не начинайте выполнение лабораторной работы, пока не уясните себе цель, метод и не составите план проведения измерений.

2. Подготовку к работе необходимо провести накануне и самостоятельно в следующем порядке:

а) прочесть методическое руководство к работе, выяснить, какие физические законы используются при решении задачи и какие закономерности лежат в основе расчетных формул, ознакомиться со списком рекомендованной литературы. Описание каждой работы в данном пособии содержит: теоретические сведения, необходимые для выполнения работы и понимания ее сущности, описание измерительных приборов и методов измерений, описание процесса выполнения работы и требуемых результатов.

б) проработать рекомендованную дополнительную литературу, при этом особое внимание обратить на формулировку условий, в которых справедливы физические законы и расчетные формулы, лежащие в основе решения опытной задачи.

в) самостоятельно или с помощью учебных пособий вывести формулы, которые используются для расчетов в работе.

При работе в физической лаборатории необходимо соблюдать следующие правила: 1) рационально планировать свою работу; 2) все измерения и записи вести точно и аккуратно; 3) работать быстро, но без спешки, т. к. она неизбежно приводит к ухудшению результатов; 4) соблюдать все меры предосторожности при работе с электрическими приборами, ядовитыми, огнеопасными и радиоактивными веществами, строго выполнять требования по технике безопасности.

Работа в физической лаборатории требует от курсанта тщательной подготовки, поэтому кроме описания работы, рекомендуется использовать соответствующую литературу, на которую приводятся ссылки в тексте данного пособия. К работе в лаборатории на установках допускается курсанты, которые накануне выучили теоретическую часть и предъявили ее конспект, ознакомились с постановкой задачи, приборами и аппаратурой и ходом выполнения работы. По этим вопросам производится собеседование с преподавателем с выставлением предварительной оценки «на допуск к работе».

При подготовке к выполнению работы курсант обязан:

а) подготовить в лабораторной тетради конспект теоретических сведений о работе, содержащий название работы и ее индекс, цель работы, перечень используемых приборов, принципиальную и рабочую схемы установок, расчетные формулы и формулы расчета погрешностей измерений;

б) отдельно заготовить бланк отчета, в котором в процессе выполнения работы отражаются данные измерений, производится их математическая обработка, строятся графики и формулируются соответствующие выводы.

Выполнение задания требует от курсанта отчетливого представления о тех действиях, которые необходимо произвести при работе с установками, причем в том порядке, который рекомендуется в описаниях. В процессе измерений следует систематически и аккуратно записывать результаты в бланк отчета. Результаты измерений, как правило, заносятся в таблицы, форма которых дана в описаниях или разрабатывается самим курсантом. В тех случаях, когда это возможно (нет сложных расчетов), графические построения следует проводить в процессе самой работы. Оформление отчета о работе заканчивается составлением краткого вывода, в котором следует указать: 1) что и каким методом исследовалось или определялось; 2) какой результат, и с какими погрешностями (абсолютными и относительными) был получен.

На выполнение каждой работы курсанту отводится два академических часа. К лабораторным занятиям курсанты обязаны готовиться в часы их самоподготовки. Защита отчета о работе проводится в конце занятия, как правило, в день ее выполнения. В случае неготовности курсанта к защите отчета в день выполнения работы, она производится на следующих лабораторных занятиях или на консультациях преподавателя.

1.4 Оформление отчета о лабораторной работе

Полный отчет по лабораторной работе должен содержать: 1) номер (индекс) и название работы; 2) расчетные формулы; 3) схему установки; 4) таблицы с результатами измерений и первичных вычислений, необходимые графики; 5) примеры расчетов искомых

величин; 6) формулы для расчетов погрешностей измерений и расчет их значений; 7) окончательный результат измерения с указанием полученной погрешности. Пункты 1, 2, 3, 6 – курсант заносит в бланк отчета при подготовке к лабораторному занятию в домашних условиях. По остальным пунктам работа проводится в лаборатории.

Отчет подписывается преподавателем после проверки полученного результата и выставления итоговой оценки по данной работе.

www.klanau.kr.ua

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

2.1 Измерения и погрешности измерений. Общие понятия

Основой любой лабораторной работы являются **измерения физических величин**.

Измерить какую-либо физическую величину – значит сопоставить ее с другой однотипной величиной, принятой в качестве единицы измерения. В связи с тем, что физические величины функционально связаны между собой, единицы измерения для каждой из них произвольно устанавливать нельзя. В физике произвольно устанавливают единицы только для нескольких величин, которые называют **основными**. Единицы остальных величин выводятся на основании физических формул, связывающих эти величины с основными величинами. Такие единицы называют **производными** единицами. Совокупность основных и производных единиц измерения физических величин составляет **систему единиц** измерения. В настоящее время введена единая Международная система единиц СИ (SI).

Обработать измерения – это значит не только получить результат, но и оценить **погрешности** измерения, которые невозможно избежать в процессе измерения. Причинами погрешностей есть несовершенство измерительных приборов и методов измерения физических величин, несовершенство наших знаний, а также, трудности связанные с учетом всех факторов, которые сопровождают исследуемое явление, ограниченные возможности наших органов чувства и прочее. По величине погрешности судят о приемлемости полученного результата. При значительной погрешности может, например, потребоваться уточнение методики измерений, применение более точной измерительной аппаратуры и т. д. Задачей физического эксперимента состоит не только в получении точного значения измерительной величины, но и в оценке погрешностей при ее измерении. Погрешности измерений подразделяют на абсолютные и относительные.

Абсолютной погрешностью измерения некоторой величины называют число, которое указывает пределы, между которыми находятся истинное значение этой величины. Например, результат измерения длины отрезка l записывают в виде $l = (7,6 \pm 0,1)$ см. В этом выражении число 7,6 см называется результатом измерения, а число 0,1 см – абсолютной погрешностью измерения. Это означает, что истинное значение измеряемой величины l находится в интервале (7.5 – 7.7) см.

Относительной погрешностью ε называют число, которое составляет отношение абсолютной погрешности измеренной величины к ее значению. Для предыдущего примера $\varepsilon = 0,1/7,6 \approx 0,013$ или 1,3%. Именно относительная погрешность характеризует **точность измерения**. Например, если при измерении длины стола рулеткой получают результат $125,0\text{см} \pm 0,5\text{см}$, а при измерении длины стержня линейкой результат составил $12,5\text{мм} \pm 0,5\text{мм}$, то абсолютная погрешность 0,5 см, допущенная при измерении стола, значительно больше абсолютной погрешности при измерении стержня 0,5 мм. Однако, относительная погрешность измерения длины стержня составляет $\varepsilon_1 = 0,5/12,5 = 0.04$ (4%), а относительная погрешность измерения длины стола равна $\varepsilon_2 = 0,5/125 = 0,004$ (0,4%). Это означает, что длина стола измерена в 10 раз точнее, чем длина стержня.

Измерения подразделяются на **прямые** и **косвенные**.

Прямые измерения производятся непосредственно **измерительными приборами**. Например, измерение длины производится непосредственно линейкой (штангенциркулем или микрометром), измерение времени – секундомером, измерение массы – взвешиванием на весах и т.д.).

Косвенные измерения производятся на основе математических действий над результатами прямых измерений. Так, например, площадь прямоугольника S измеряют на основе формулы $S = ab$, а длину a и ширину b измеряют непосредственно (например, с помощью линейки).

Погрешности прямых измерений. По своему характеру погрешности прямых измерений физических величин подразделяют на систематические, случайные и промахи.

Систематические погрешности всегда имеют определенный знак, т.е. измеренное значение величины при каждом измерении будет либо больше, либо меньше истинного значения этой величины. Систематической погрешностью обладают, например, «спешащие» или, наоборот, «отстающие» часы. Другим примером является погрешность отсчета нуля. Она возникает вследствие неточного регулирования отсчетного устройства. Например, амперметр, показания которого в отсутствия тока составляет $0,2\text{ А}$, во время измерений будет давать завышенные показания – результаты измерения будут иметь систематическую погрешность, равную $+0,2\text{ А}$. Ее можно устранить, установив перед проведением измерений корректором стрелку прибора на нулевую отметку. Часто такие погрешности устранить невозможно. Пусть, например, термометр опущенный в тающий лед, показывает не 0°С , а $-1,5^{\circ}\text{С}$. Такой термометр все время будет занижать результат измерения – будет давать систематическую погрешность, равную $-1,5^{\circ}\text{С}$. Если измерять температуру таким термометром, то для нахождения значения измеренной величины нужно к его показаниям прибавить соответствующую поправку, равную $+1,5^{\circ}\text{С}$. Заметим, что учитывать таким образом погрешность отсчета нуля можно лишь в приборах с равномерной шкалой.

В целом систематические погрешности обусловлены:

а) неправильной настройкой или неправильным изготовлением измерительных приборов, которые определяются их конструкцией и качеством изготовления.

а) неточностью избранного метода измерения, который не учитывает некоторые факторы, влияющие на результаты измерений.

Для устранения (или, по крайней мере, существенного уменьшения) систематических погрешностей следует пользоваться правильно настроенными приборами и корректными методами измерений.

Случайные погрешности – это погрешности, которые при различных измерениях одной и той же величины могут изменять свое значение и знак без всякой видимой закономерности.

Случайные погрешности представляют собой суммарный эффект влияния на процесс измерения многих факторов, каждый из которых независимо от других вносит в результат измерения свою погрешность.

Случайные погрешности обусловлены:

а) недостаточной чувствительностью и недостаточной точностью измерительных приборов;

б) несовершенством органов чувств экспериментатора (главным образом, зрения и слуха);

в) влиянием окружающей среды на процесс измерения (вибрации, воздушные течения, изменения температуры, освещения и др.).

Свойства случайных погрешностей:

а) чем больше абсолютная величина случайной погрешности, тем менее ее вероятность, то есть, тем реже она встречается;

б) случайные погрешности, одинаковые по абсолютной величине, но противоположные по знаку – равновероятны, то есть встречаются одинаково часто;

в) среднее арифметическое из значений случайных погрешностей измерений одной и той величины направляется к нулю при условии неограниченного возрастания количества измерений этой величины.

Устранить случайные погрешности в принципе невозможно. Для повышения точности процесс измерения данной величины проводят несколько раз, и в качестве результата измерения используют среднее арифметическое полученных результатов. Важным положением теории погрешностей является утверждение: среднее арифметическое результатов нескольких измерений одной и той же величины является более надежным, чем результат каждого отдельного измерения.

Промахи – это результаты измерений, которые резко выделяются из ряда последовательных результатов однотипных измерений. Они обусловлены внезапной поломкой измерительного прибора, нарушением правил его эксплуатации, неправильным отсчетом показаний, неразборчивыми записями результата измерения и т.п. Во время вычисления значения измерительной

физической величины такие ошибочные результаты не учитываются и выполняется повторное (контрольное) измерение.

2.2 Расчет погрешностей измерений

Расчет погрешностей прямых измерений. Пусть, в результате нескольких измерений физической величины a получена последовательность значений: $a_1, a_2, \dots, a_n$. Тогда среднее арифметическое значение этой величины определяется по формуле $\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$. Абсолютные погрешности отдельных измерений будут Δa_i равняться модулю различия среднего значения $\bar{a}$ и результатов отдельных измерений a_i :

$$\Delta a_1 = |\bar{a} - a_1|, \Delta a_2 = |\bar{a} - a_2|, \dots, \Delta a_n = |\bar{a} - a_n|.$$

Величину $\overline{\Delta a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i$ называют **средней абсолютной погрешностью измерения**.

Итак, измеренное значение данной величины находится в пределах:

$$\bar{a} - \overline{\Delta a} \leq a \leq \bar{a} + \overline{\Delta a}.$$

Окончательный результат измерения принято записывать в таком виде:

$$a = \bar{a} \pm \overline{\Delta a}.$$

Во время оценивания средней абсолютной погрешности измеренной физической величины следует принять к вниманию такие возможные случаи:

1. Если в результате нескольких измерений полученные одинаковые значения измеряемой величины или вычисленная погрешность меньше собственной погрешности измерительного прибора, тогда за среднюю абсолютную погрешность измеренной величины следует принять **инструментальную погрешность** измерительного прибора. Это правило касается также случаев, когда выполняется только одно измерение физической величины.

2. Инструментальная погрешность обычно указывается в паспорте или описании прибора. На шкалах многих электроизмерительных приборов (амперметров, вольтметров и др.) инструментальная погрешность указывается в виде значения **класса точности** этого прибора. Величина класса точности равна абсолютной инструментальной погрешности прибора, выраженной в процентах от максимального значения измеряемой величины на шкале прибора. Например, максимальное значение силы тока, измеряемое амперметром равно 10 А, класс точности 0,5. Это значит, что абсолютная погрешность измерения силы тока этим прибором составляет $10 \cdot 0,5 / 100 = 0,05$ (А).

3. Если инструментальная погрешность прибора не известна, то в качестве ее значения обычно принимается половина цены деления шкалы прибора. В случае, когда инструментальная погрешность очень мала, ее не учитывают.

4. Погрешности постоянных величин считаются равными нулю. При использовании табличных значений физических величин, определенных с большой точностью, абсолютными погрешностями этих величин можно пренебречь, если другие величины измеряются в процессе эксперимента с меньшей точностью.

Для полной характеристики точности прямых измерений, кроме средней абсолютной погрешности, рассчитывают относительную погрешность ε :

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta a}}{a}, \text{ или в процентах: } \varepsilon = \frac{\overline{\Delta a}}{a} \cdot 100\%.$$

При выполнении расчетов следует придерживаться правил действий над приближенными числами.

Погрешности косвенных измерений. При косвенных измерениях искомую физическую величину и ее погрешность рассчитывают на основе результатов прямых измерений величин, функцией которых она является. Пусть, для простоты, искомая величина C является функции лишь двух переменных a и b , измеренных непосредственно (их средние абсолютные погрешности соответственно равны $\overline{\Delta a}$ и $\overline{\Delta b}$). Средняя абсолютная и относительная погрешности величины C в зависимости от вида функции $C = f(a, b)$ рассчитываются по определенным правилам.

Некоторые формулы для расчета погрешностей при косвенных измерениях представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Таблица формул для нахождения абсолютных и относительных погрешностей

№ п/п	Алгебраическое выражение	Значение абсолютной погрешности	Значение относительной погрешности
1	$a + b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$
2	$a - b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$
3	$c \cdot a$ ($c = const$)	$c \cdot \Delta a$	$\frac{\Delta a}{a}$
4	$\frac{a}{c}$ ($c = const$)	$\frac{\Delta a}{c}$	$\frac{\Delta a}{a}$
5	$a \cdot b$	$a\Delta b + b\Delta a$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
6	$\frac{a}{b}$	$\frac{a\Delta b + b\Delta a}{b^2}$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
7	a^2	$2a\Delta a$	$2\frac{\Delta a}{a}$
8	a^3	$3a\Delta a$	$3\frac{\Delta a}{a}$
9	$\sqrt{a}$	$\frac{\Delta a}{2\sqrt{a}}$	$\frac{\Delta a}{2a}$
10	$\sqrt[3]{a}$	$\frac{\Delta a}{3\sqrt[3]{a^2}}$	$\frac{\Delta a}{3a}$
11	$ca^n b^m$ ($c = const$)	$c(n \frac{\Delta a}{a} + m \frac{\Delta b}{b})$ $a^n b^m$	$ n \frac{\Delta a}{a} + m \frac{\Delta b}{b}$

2.3 Графическое представление результатов эксперимента

В экспериментальной физике результаты измерений зачастую важно представить в наглядной форме, удобной для использования и обработки. Обычно для этого составляют таблицы, графики и уравнения.

Представление данных опыта в виде таблиц облегчает сравнение различных значений измеряемых величин, а также проведение результатов измерений.

Для этого, чтобы найти связь между переменными, строят график. При этом функциональные зависимости становятся явными, а результаты опыта наглядными. График наглядно представляет зависимость между, как правило, двумя переменными. При построении графиков следует придерживаться основных правил:

1. Графики выполняются на миллиметровой бумаге, на которую наносятся координатные оси. По горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывается значение независимой переменной – аргумента, по вертикальной (оси ординат) – значение функции, определяемой величины.

2. Следует правильно выбрать масштаб и интервал величин при разметке осей. Масштаб должен быть простым: одному делению (сантиметру или миллиметру) шкалы должно соответствовать значение единицы измерения, кратное 10 (например, 0,1; 1; 10 и т.д.), кратное 2 (например, 0,2; 2; 4 и т.д.) или 5 (допустимы также 2,5 и 4), или эти же числа, умноженные на $10^{\pm n}$ (n – целое). Количество делений с цифрами на каждой оси составляет обычно от 4 до 10.

3. На осях графика следует указывать символ откладываемой величины и ее размерность. Обычно туда же выносятся и порядок масштаба этой величины ($10^{\pm n}$).

4. Масштаб нужно выбрать так, чтобы кривая заняла весь лист, а погрешность измерения соответствовала одному – двум мелким делениям шкалы. При этом отсчет величин, откладываемых по осям координат, не обязательно начинать с нуля. Иногда удобнее выбрать в качестве начала отсчета некоторое начальное ненулевое значение величины и таким образом увеличить масштаб, но

погрешность при этом должна составлять, по-прежнему, одно-два мелких деления

5. Экспериментальные данные наносятся на график хорошо выделяющимися точками. Если строится несколько кривых, используются различные значки: крестики, кружочки и др.

6. Точки на график нужно наносить точно и тщательно, обводя их кружком или каким-нибудь другим знаком.

7. Затем наносится наиболее подходящая кривая с наименьшим числом перегибов, проходящая как можно ближе к нанесенным точкам. На каждом участке графика точки должны располагаться примерно поровну по обеим сторонам этой кривой.

8. Результаты удобно обрабатывать, если кривая близка к прямой, наклоненной под углом к оси абсцисс, примерно равным 45° . Для этого на осях графика могут откладываться не сами величины, а их функции (логарифмы, обратные величины и т. п.) так, чтобы полученный график был прямой линией.

Контрольные вопросы

1. Что называется измерением физической величины?
2. Что называется абсолютной погрешностью измерения? Относительной погрешностью?
3. Какая из погрешностей (абсолютная или относительная) определяет точность измерения и почему?
4. Какие измерения называются прямыми? Косвенными?
5. Как подразделяются погрешности прямых измерений?
6. Чем обусловлены случайные, систематические погрешности, промахи?
7. Сформулируйте алгоритм расчета погрешностей прямых измерений.
8. Сформулируйте алгоритм расчета погрешностей косвенных измерений.
9. Как рассчитываются погрешности измерительных приборов?

ГЛАВА 3 РАБОТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

Лабораторная работа М–0 **Простейшие измерения**

Для допуска к работе курсант должен уметь:

- выполнять прямые измерения линейных размеров, массы, времени с помощью измерительных инструментов;
- выполнять косвенные измерения (определять: среднюю плотность тел правильной формы, ускорение земного тяготения);
- аналитически обрабатывать данные эксперимента и выполнять оценку погрешностей прямых и косвенных измерений.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний (см. Глава 2), рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: ознакомление с методами и приборами для измерения времени, линейных размеров тел и их масс, а также с методами обработки экспериментальных данных и оценки погрешностей измерений; определение плотности вещества твердых тел правильной геометрической формы (цилиндр, шар) и ускорения свободного падения.

Оборудование: линейка, штангенциркуль, микрометр, весы, секундомер, образцы для измерений (цилиндр, шар), математический маятник.

Краткие теоретические сведения

Измерением называют экспериментальное определение количественного значения физической величины с помощью соответствующих измерительных приборов и устройств. Измерение физической величины включает в себя наблюдение и выполнение необходимых математических операций по определению результата измерения.

Имеется огромное количество физических величин, которые измеряются как прямыми, так и косвенными методами. Однако,

можно выделить основные физические величины, измерения которых проводятся наиболее часто, либо по результатам измерения которых можно судить об остальных физических параметрах. К таким измерениям можно отнести измерения **линейных размеров, времени, массы.**

Измерения линейных размеров физических тел являются важнейшими в механике. Простейшим прибором для измерения длины является линейка, размеченная по эталону в единицах длины. Разновидностью линеек являются гибкие устройства – рулетки, метры и т.д. Точность этих приборов невелика, поскольку сказывается тепловое расширение измерительных устройств, изменение их размеров при хранении и эксплуатации и т. п. Приборную абсолютную погрешность указанных инструментов принято считать равной половине цены деления. Большей точности достигают в приборах с нониусом.

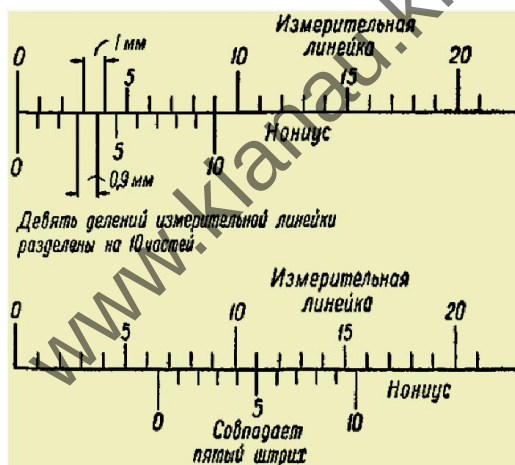


Рисунок 3.1 Шкала с нониусом

Нониусом называется дополнительная шкала, позволяющая повысить точность измерений. Линейным нониусом называется маленькая линейка с делениями, которая может скользить вдоль измерительной линейки, называемой масштабом (см. рис.1). Деления на нониусе нанесены так, что одно деление нониуса составляет:

$$(m - 1) / m = 1 - 1 / m \quad (1)$$

делений масштаба, где m – общее число делений нониуса (на рис. 1: $m = 10$). Видно, что если нулевые деления измерительной линейки и нониуса совпадают (верхняя часть рис.3.1), то m делений нониуса приходятся на $m-1$ делений масштаба. Именно поэтому можно, пользуясь нониусом, производить отсчеты с точностью до $1/m$ части наименьшего деления масштаба.

При измерениях нулевое деление нониуса сдвигается относительно нулевого деления масштаба (см. пример измерения с помощью шкалы нониуса на нижней части рис. 3.1, в котором ноль нониуса располагается между 6 и 7 делениями масштаба). Но одно из делений нониуса всегда совпадает с каким-либо делением масштаба (на рис. 1 это 5-ое деление). Поэтому измеренная длина равна 6,5 мм.

На рис. 3.2 представлен один из типов штангенциркулей, в котором для измерения линейных размеров тел с точностью до 0,1 мм используется линейный нониус (7), нанесенный на его движок (2). Измерительная линейка (3), нанесена на корпусе (1). С помощью этого инструмента может измерять: внешний размер тел с помощью нижних губок (5), диаметр отверстий и ширину прорезей с помощью верхних губок (4) и глубину отверстий и прорезей посредством глубомера (6). Стопорный винт (8) предназначен для фиксации подвижных частей (губок и глубомера) штангенциркуля при разметке или калибровке деталей.

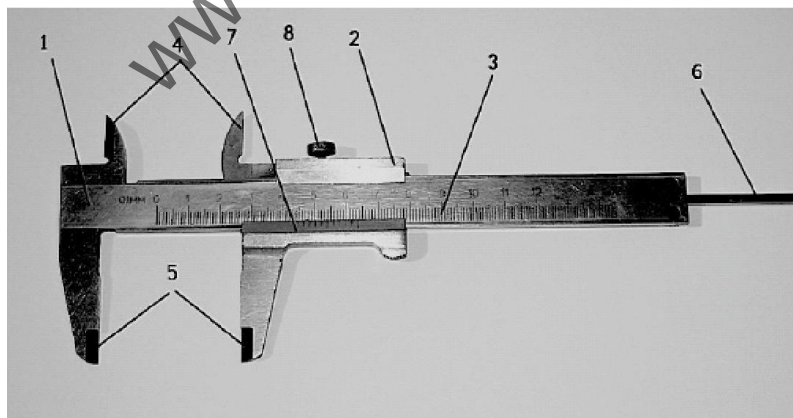


Рисунок 3.2 Штангенциркуль

Более точные измерения длин производятся с помощью микрометров (рис. 3.3). В этом измерительном инструменте деления измерительной линейки с шагом 1,0 мм (7) нанесены с двух сторон линии (со сдвигом друг относительно друга на 0,5 мм) вдоль поверхности цилиндра, называемого стеблем (3). Его шкала нониуса (6) нанесена вдоль левого края барабана (4), так что она перпендикулярна шкале измерительной линейки (7). Все элементы микрометра крепятся на скобе (8), за которую держат инструмент при проведении измерений.



Рисунок 3.3 Микрометр

Измерения микрометром проводятся следующим образом. Первоначально совмещаются измерительные поверхности неподвижной пятки (1) и подвижного микрометрического винта (2), вращая (заворачивая) головку с трещоткой (5) по часовой стрелке. Когда поверхности совместятся, головка начинает прокручиваться и щелкает трещотка. После этого необходимо проверить совпадение нулевой риски шкалы нониуса и нулевой риски шкалы линейки, так как со временем или из-за неправильной эксплуатации микрометра может возникнуть несовпадение этих рисок. В случае его наличия обратитесь за помощью к преподавателю, чтобы в дальнейшем правильно проводить измерения.

После проверки нужно, вращая (отворачивая) барабан (4) против часовой стрелки, развести измерительные поверхности

пятки (1) и микрометрического винта (2) на расстояние немного большее линейного размера измеряемого тела, чтобы последнее свободно поместилось между указанными измерительными поверхностями. Затем, заворачивая головку с трещоткой (5), подводятся измерительные поверхности в соприкосновение с телом до тех пор, пока не начнет щелкать трещотка, и вычисляется результат измерения по значениям на шкалах линейки стебля (7) и нониуса барабана (6).

Во время подготовки к проведению измерений при отворачивании барабана обратите внимание на то, что один полный оборот барабана приводит к сдвигу микрометрического винта (2) на 0,5 мм. Поскольку общее число делений барабана равно 50, одно деление (точность) шкалы нониуса соответствует: $0,5 \text{ мм} / 50 \text{ дел} = 0,01 \text{ мм}$, что указано на барабане (4).

На рис. 3. 4 приведен в качестве примера результат некоторого измерения. Видно, что полученный размер тела по показаниям шкал линейки и нониуса равен, соответственно:

$$5,5 \text{ мм} + 0,46 \text{ мм} = 5,96 \text{ мм}.$$

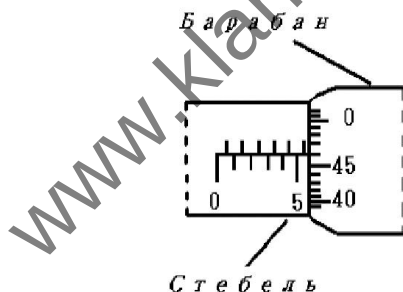


Рисунок 3.4

Примечание: Во избежание повреждений изучаемого тела и его поверхности, а также измерительных поверхностей и механизма микрометра закручивание микрометрического винта (2) разрешается проводить только посредством головки с трещоткой (5)

Точность современных механических микрометров с рычажным нониусом достигает 2 мкм.

Плотностью ρ однородного тела называется величина, определяемая по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (2)$$

где: m – масса тела (определяется взвешиванием на технических весах); V – объем тела (находится посредством измерения его линейных размеров).

Для цилиндра

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} h, \quad (3)$$

где h – высота, а d – диаметр цилиндра.

Для шара

$$V = \frac{\pi \cdot D^3}{6}, \quad (4)$$

где D – диаметр шара.

С учетом формул (2 – 4) для плотности цилиндра имеем

$$\rho = \frac{4m}{\pi \cdot h \cdot D^2}, \quad (5)$$

а для плотности шара, соответственно

$$\rho = \frac{6 \cdot m}{\pi \cdot D^3}. \quad (6)$$

Математический маятник – это модельная (т. е. идеализированная) система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити и колеблющейся под действием силы тяжести. Хорошим приближением математического маятника является тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити (диаметр шарика во много раз меньше длины нити, масса нити во много раз меньше массы шарика). Второй конец нити закреплен неподвижно.

Гармоническим колебанием физической величины $A(t)$ называется процесс изменения ее с течением времени t по гармоническому закону, например:

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \quad (7)$$

где A_0 – амплитуда колебаний – максимальное значение колеблющейся величины, ω_0 – циклическая частота колебания.

Величина $\varphi(t) = (\omega_0 t + \varphi_0)$, носит название фазы колебания, φ_0 – начальная фаза (значение фазы в момент $t = 0$).

Для математического маятника колеблющейся величиной является угол отклонения нити от вертикали. При малых углах отклонения математический маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой ω_0 и периодом колебания T .

Периодом колебания T называется промежуток времени, за который совершается одно полное колебание. Период колебаний математического маятника определяется по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (8)$$

где l – длина нити маятника, g – ускорение свободного падения ($g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$).

Из формулы (8) следует, что период колебаний математического маятника не зависит от его массы, и ее можно использовать для определения ускорения свободного падения.

$$g = 4\pi^2 \cdot \frac{l}{T^2} \quad (9)$$

Ход работы

1. Измерение плотности цилиндра

1.1. Определить высоту цилиндра штангенциркулем.

1.2. Повторить измерения не менее 3-х раз, каждый раз поворачивая цилиндр.

1.3. Записать данные измерений в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

№ изм.	h , мм	$h_{\text{ср}}$, мм	Δh , мм	$\Delta h_{\text{ср}}$, мм	$\Delta h_{\text{пр.}}$, мм	$\Delta h = \Delta h_{\text{ср}} + \Delta h_{\text{пр.}}$, мм
1						
2						$h = h_{\text{ср}} \pm \Delta h$
3						
4						$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}}$

1.4. Вычислить среднее значение высоты цилиндра $h_{\text{ср}}$, абсолютную погрешность Δh и относительную погрешность ε_h .

1.5. Записать в таблицу 3.1 абсолютную погрешность измерительного прибора $\Delta h_{\text{пр}}$.

1.6. Измерить диаметр d цилиндра микрометром, повторить измерения 3-5 раз.

1.7. Вычислить абсолютную Δd и относительную погрешность ε_d .

1.8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

№ изм.	d , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	Δd , мм	$\Delta d_{\text{ср}}$, мм	$\Delta d_{\text{пр}}$, мм	$\Delta d = \Delta d_{\text{ср}} + \Delta d_{\text{пр}}$, мм
1						
2						$d = d_{\text{ср}} \pm \Delta d$
3						
4						$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_{\text{ср}}}$
5						

В таблицах 3.1 и 3.2 Δh и Δd – абсолютные погрешности отдельных измерений;

$\Delta h_{\text{ср}}$ и $\Delta d_{\text{ср}}$ – средние абсолютные погрешности (по результатам измерений);

$\Delta h_{\text{пр}}$ и $\Delta d_{\text{пр}}$ – абсолютные приборные (инструментальные) погрешности;

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}}; \quad \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_{\text{ср}}} \quad - \text{относительные погрешности высоты и}$$

диаметра цилиндра.

1.9. Измерить массу цилиндра взвешиванием на аналитических весах. Результат записать в виде $m = m_0 \pm \Delta m$, где m_0 – результат измерения, Δm – абсолютная погрешность измерения массы, вычисляемая по таблице 3.3 как сумма абсолютных погрешностей гирь, используемых при взвешивании.

Таблица 3.3

Погрешности гирь		Погрешности гирь	
Номинальное значение массы гири	Погрешность массы гири	Номинальное значение массы гири	Погрешность массы гири
10 мг; 20 мг, 50 мг, 100мг	± 1 мг	5 г	± 8 мг
200 мг	± 2 мг	10 г	± 12 мг
500 мг	± 3 мг	20 г	± 20 мг
1 г	± 4 мг	50 г	± 30 мг
2 г	± 6 мг	100 г	± 40 мг

1.10. Вычислить с помощью формулы (5) значение результата измерения плотности материала цилиндра ρ_0 (в кг/м^3).

1.11. Вычислить относительную погрешность измерения плотности цилиндра по формуле:

$$\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta m}{m_0} + \frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}} + 2 \frac{\Delta d}{d_{\text{ср}}}. \quad (10)$$

1.12. Вычислить абсолютную погрешность измерения плотности цилиндра по формуле:

$$\Delta \rho = \rho_0 \cdot \varepsilon_{\rho} \quad (11)$$

1.13. Результат измерения плотности цилиндра записать в виде:
 $\rho = \rho_0 \pm \Delta \rho$.

2. Измерение плотности шара

2.1. Измерить диаметр D шара микрометром, повторить измерения 3-5 раз, каждый раз поворачивая шар.

2.2. Вычислить абсолютную ΔD и относительную погрешность ε_D . Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

№ изм.	D , мм	$D_{\text{ср}}$, мм	ΔD , мм	$\Delta D_{\text{ср}}$, мм	ΔD пр., мм	$\Delta D = \Delta D_{\text{ср}} +$ $\Delta D_{\text{пр.}}, \text{ мм}$
1						
2						$D = D_{\text{ср}} \pm \Delta D$
3						
4						$\varepsilon_D = \frac{\Delta D}{D_{\text{ср}}}$
5						

Обозначения в таблице 3.4 аналогичны обозначениям в таблице 3.2

2.4. Измерить массу шара по методу, аналогичному изложенному в п. 1.9. Результат записать в виде: $m = m_0 \pm \Delta m$.

2.5. Вычислить с помощью формулы (6) значение результата измерения плотности материала шара ρ_0 (в кг/м^3).

2.6. Вычислить относительную погрешность измерения плотности шара по формуле:

$$\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\Delta m}{m_0} + 3 \frac{\Delta D}{D_{\text{ср}}}. \quad (12)$$

2.7. Вычислить абсолютную погрешность измерения плотности шара по формуле:

$$\Delta \rho = \rho_0 \cdot \varepsilon_{\rho} \quad (13)$$

1.13. Результат измерения плотности шара записать в виде: $\rho = \rho_0 \pm \Delta \rho$.

3. Определение ускорения свободного падения

Примечание: угол отклонения маятника от положения равновесия в процессе колебаний не должен превышать 7°

3.1. Определить длину математического маятника l . Результат записать в виде: $l = l_0 \pm \Delta l$, где $\Delta l = \Delta l_{\text{пр}}$ – абсолютная погрешность измерения длины, равная приборной (инструментальной) погрешности (в данном случае – абсолютная погрешность линейки).

3.2. Определить с помощью секундомера время t , необходимое для совершения $N = 20-30$ полных колебаний маятника (углы отклонения маятника должны быть $40 - 60$). Вычислить период колебаний маятника. Результат записать в виде: $T = T_0 \pm \Delta T$, где $T_0 = \frac{t}{N}$ - значение периода колебаний, $\Delta T = \frac{\Delta t_{\text{пр}}}{N}$, где $\Delta t_{\text{пр}}$ – приборная (инструментальная) погрешность (в данном случае – абсолютная погрешность секундомера).

3.3. Рассчитать с использованием формулы (9) значение результата измерения ускорения свободного падения и сравнить его с табличным значением $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$.

3.4. Рассчитать относительную погрешность ускорения свободного падения по формуле

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g_0} = \frac{\Delta l}{l_0} + 2 \frac{\Delta T}{T_0} \quad (14)$$

3.5. Вычислить абсолютную погрешность измерения ускорения свободного падения по формуле:

$$\Delta g = g_0 \cdot \varepsilon_g \quad (15)$$

3.6. Результат измерения ускорения свободного падения записать в виде: $g = g_0 \pm \Delta g$.

Контрольные вопросы

1. Что называется плотностью вещества и в каких единицах она измеряется?
2. По каким формулам определяются объемы цилиндра и шара?
3. Вывести рабочие формулы для определения плотности цилиндра и шара.
4. Почему в настоящей работе массу цилиндра и шара рекомендовано измерять один раз, а его линейные размеры не менее трех?
5. Почему полученная в работе плотность материала может не совпадать со значением плотности подобного материала в справочнике?
6. Какой процесс называется гармоническим колебанием?
7. Что называется математическим маятником?

8. От чего зависит период колебаний математического маятника? Зависит ли он от массы маятника?

9. Обосновать формулы для расчета относительных погрешностей (10), (12), (14).

www.klapau.kr.ua

Лабораторная работа М–1

Изучение законов динамики на машине Атвуда

Для допуска к данной лабораторной работе курсант должен уметь:

- формулировать и объяснять физический смысл понятий: материальная точка, система отсчета, перемещение, путь, скорость, ускорение, масса, сила, импульс, сила тяжести, вес тела, ускорение свободного падения;
- записать формулы кинематики равномерного и равноускоренного движения;
- формулировать законы Ньютона и объяснять их физический смысл.

Цель работы: изучить закономерности равномерного и равноускоренного движений.

Для подготовки к работе кроме настоящих методических указаний рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Г.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.1, В.В. Фоменко «Курс физики. Модуль 1. Классическая механика».

Оборудование: машина Атвуда, набор перегрузков, секундомер, источник питания, ключ, соединительные провода.

Краткие теоретические сведения

В данной лабораторной работе изучаются основные законы кинематики и динамики поступательного движения тела. **Поступательное движение** – один из видов механического движения тела, при котором все его точки **движутся одинаково**. Это значит, что для описания движения тела достаточно описать движение какой-либо одной его точки. Обычно в качестве такой точки выбирают **центр масс** тела. Таким образом, в задачах описания поступательного движения тела, для этого тела можно использовать модель **материальной точки** (или **механической частицы**), в которой сосредоточена вся масса тела. Эту модель используют также и в случае, если можно пренебречь размерами

тела по сравнению с характерными размерами, характеризующими его движение.

Основными кинематическими характеристиками движения механической частицы (или поступательного движения тела, для которого рассматривают движение его центра масс) являются: ее радиус-вектор $\vec{r}(t)$, зависящий от времени t , вектор перемещения $\Delta\vec{r}$, совершаемого за некоторый промежуток времени Δt , путь $S(t)$, мгновенная скорость $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ (первая производная радиуса-вектора

частицы по времени), ускорение $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$ (первая производная вектора скорости частицы по времени или вторая производная ее радиуса-вектора по времени).

Основными динамическими характеристиками частицы или поступательно движущегося тела являются масса m (мера инертных и гравитационных свойств тела) и вектор импульса $\vec{p} = m\vec{v}$.

Как правило, при движении тело взаимодействует с другими телами или физическими полями. Величина и направление этого взаимодействия характеризуется вектором силы $\vec{F}$.

Динамика тел описывается **законами Ньютона**.

Первый закон Ньютона устанавливает область применения остальных законов Ньютона. Первый закон Ньютона формулируется следующим образом: существуют такие системы отсчета в которых тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если на это тело не действуют внешние силы или их действие взаимно компенсируется. Такие системы отсчета называются **инерциальными**.

Второй закон Ньютона гласит: скорость изменения импульса тела равна векторной сумме всех сил, действующих на это тело.

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \sum \vec{F}. \quad (1)$$

Учитывая, что в ньютоновской механике $m = \text{const}$, и используя понятие ускорения, для второго закона Ньютона имеем:

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}. \quad (2)$$

Согласно **третьему закону Ньютона** силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга, равны по величине и противоположны по направлению.

Для изучения законов движения используется устройство называемое машиной Атвуда (рис. 3.5). Машина Атвуда имеет вертикальную шкалу 1 с делениями. На верхнем конце шкалы установлен блок 2, вращающийся с небольшим трением, которое учитывается в работе. Через блок переброшена нить с грузами 3 и 4 равной массы. Электрическая схема подключения машины Атвуда, секундомера и источника питания для изучения равноускоренного движения приведена на рис. 2.

В исходном положении груз 3 находится на платформе 7, ключ К замкнут, электромагнит 8 фиксирует нить с грузами. Если на груз 4 положить перегрузок 5 и разомкнуть ключ, то грузы начнут двигаться – **равноускоренно**. Одновременно включится секундомер С. При попадании груза 4 на приёмный столик 6 контакты последнего размыкают цепь секундомера С и он останавливается. Таким образом, секундомер регистрирует время движения грузов от размыкания ключа до попадания груза 4 на приёмный столик, который можно фиксировать в различных точках шкалы с помощью прижимного винта.

В данном случае ускорение грузов определяется по формуле:

$$a = \frac{2L}{t^2} \quad (3)$$

где L – расстояние от нижнего торца груза 4 до плоскости приёмного столика 6; t – время, регистрируемое по секундомеру.

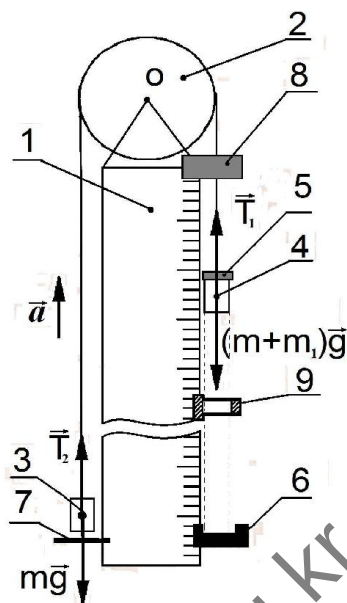


Рисунок 3.5

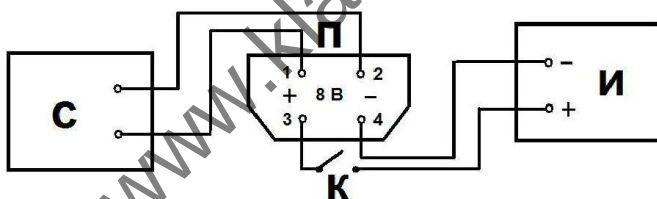


Рисунок 3.6

Считая нить нерастяжимой и невесомой, составим уравнения, описывающие движения системы. Для груза 3 второй закон Ньютона (2) в проекции на направление движения этого груза даёт:

$$T_2 - mg = ma, \quad (4)$$

где T_2 – сила натяжения левой части нити;
 m – масса груза 3;
 g – ускорение свободного падения;
 a – модуль (величина) ускорение движения грузов.

Аналогично составляется уравнение движения груза 4 с перегрузком 5:

$$(m + m_1)g - T_1 = (m + m_1)a, \quad (5)$$

где m_1 – масса перегрузка 5;

T_1 – сила натяжения правой части нити.

Различие в натяжениях нити справа и слева от шкалы обусловлено конечной массой блока 2, его вращением и наличием трения в оси блока.

Уравнение закона динамики вращательного движения блока, имеет вид:

$$T_1 \cdot R - T_2 \cdot R = I \cdot \varepsilon + M_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где R – радиус блока;

I – момент инерции блока;

$\varepsilon = a / R$ – угловое ускорение вращения блока;

$M_{\text{тр}}$ – момент силы трения на оси блока.

Решая систему уравнений (4–6) получим:

$$a = \frac{m_1 g - (M_{\text{тр}} / R)}{2m + m_1 + (I / R^2)}. \quad (7)$$

Учитывая, что $m_1 \ll 2m + (I / R^2)$, окончательно имеем:

$$a = \frac{m_1 g - (M_{\text{тр}} / R)}{2m + (I / R^2)} \quad (8)$$

Для изучения законов **равномерного движения** на шкалу 1 дополнительно крепится подвижное кольцо 9, а все элементы лабораторной установки собираются по схеме, приведенной на рис. 3.7. Кольцо 9 устроено так, что при прохождении груза 4 через это кольцо, перегрузок 5 задерживается на кольце и замыкает цепь секундомера (секундомер запускается). Тогда массы с левой и правой сторон шкалы становятся равными, а значит, система грузов начинает двигаться равномерно и прямолинейно (в пренебрежении моментом сил трения в блоке). Как и при изучении законов равноускоренного движения, секундомер остановится при достижении груза 4 приёмного столика. Таким образом, секундомер будет фиксировать время от прохождения верхнего торца груза верхней плоскости

кольца до касания нижнего торца грузика приёмного столика 6. Для различных значений расстояния H , пройденного грузом 4 от кольца 9 до приемного столика 6 должно выполняться соотношение:

$$H_1/t_1 = H_2/t_2 = H_3/t_3 \dots = H_n/t_n, \quad (9)$$

где t_n – время, регистрируемое секундомером.

Ход работы

Проверка закона равномерного движения

1. Собрать схему рис. 3.7

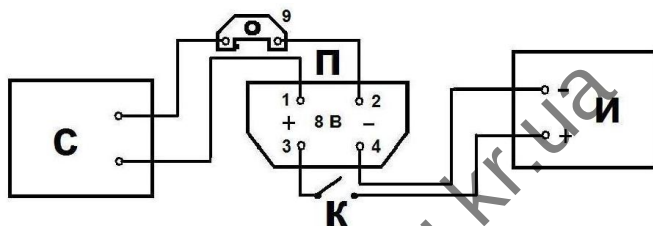


Рисунок 3.7

2. Установить кольцо 9 на расстоянии 30 см от верхнего конца шкалы, а приемный столик 6 так, чтобы длина участка движения груза 4 составила $H = 20$ см. С помощью винтов, расположенных на подставке линейки машины Атвуда, отрегулировать установку так, чтоб груз 4 свободно проходил через кольцо 9, не касаясь его стенок, и попадал в чашку приемного столика, не ударяясь о её края. Достаточная точность эксперимента будет обеспечена только при выполнении этих условий.

3. Подключить источник питания и секундомер в сеть напряжением 220 В.

Нажатием кнопки “Уст.нуля”, расположенную на верхней панели секундомера, установить стрелку секундомера на ноль. При этом ключ К должен быть разомкнут. После этого перевести груз 3 на платформу 7 и включить ключ К. Прижимное устройство электромагнита должна плотно захватить нить.

4. На груз 4 положить перегрузок с наибольшей массой и выключить ключ К. После достижения грузиком приёмного столика 6 записать показания секундомера в табл. 3.5.

Таблица 3.5

H (см)	20	30	40
t_1 , с			
t_2 , с			
t_3 , с			
t_{cp} , с			
Δt , с			
H/t_{cp} , см/с			

- Пункт 4 повторить для значения H , указанных в табл. 1.
- Проверить соотношение H/t по формуле (9).
- Сделать выводы.

Проверка законов равноускоренного движения

- Собрать схему рис. 3.6
- Установить приемный столик 6 так, чтобы расстояние, которое пройдет груз 4 от начала движения до остановки на приемном столике составило $L \approx 20$ см. Перевести груз 3 на платформу 7 и включить ключ К. Прижимное устройство электромагнита должно захватить нить.
- Положить на груз 4 перегрузок с наибольшей массой. Разомкнуть ключ К – грузы должны прийти в движение, а секундомер – включиться. При достижении грузом 4 столика 6 секундомер выключиться. Показания секундомера занести в табл. 3.6. Опыт повторить не менее 3-х раз.

Таблица 3.6

L , см	20	40	60
t_1 , с			
t_2 , с			
t_3 , с			
t_{cp} , с			
Δt , с			
a , см/с ²			
Δa , см/с ²			

3. Повторить п. 2 для $L = 40$ см и $L = 60$ см и вычислить для каждого значения L ускорение a (уравнение (3)). Рассчитать погрешность измерения ускорения Δa для каждого случая. Результаты занести в табл. 2

4. Сделать выводы.

Проверка второго закона Ньютона.

1. При значении $L=60$ см. повторить п.2. предыдущего опыта для трех различных масс перегрузков с массами m_1, m_2, m_3 .

2. Вычислить ускорение a_i ($i = 1, 2, 3$) для каждого случая по формуле (3). Рассчитать погрешность измерения ускорения Δa_i для каждого случая. Результаты занести в табл. 3.7.

Таблица 3.7

m_i , г			
t_1 , с			
t_2 , с			
t_3 , с			
$t_{\text{ср.}}$, с			
Δt , с			
a , м/с ²			
Δa , м/с ²			

3. Построить график $a = f(m_i \cdot g)$, где m_i – масса перегрузка. Проверить линейность данной зависимости (второй закон Ньютона). Определить из графика величину $M_{\text{тр}}$, используя уравнение (8) и считая $R = 8,5$ см.

4. Определить силу трения на оси блока, считая что ее радиус равен $R_0=0,5$ см. Блок считать однородным диском, его масса равна 162,6 г.

5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и запишите законы Ньютона.

2. Что изучают темы курса физики “Кинематика частицы”, “Динамика частицы”.

3. Запишите формулы кинематики равномерного и равноускоренного движения.

4. Почему равенства (9) не выполняются точно?

5. Запишите уравнение второго закона Ньютона для груза без перегрузка и груза с перегрузком в опыте по изучению равноускоренного движения.

6. Выведите формулу (8).

7. Чему равен отрезок оси абсцисс, отсекаемый графиком $a = f(m_i; g)$

8. Как изменится движение системы, если увеличить массы постоянных грузов m , не меняя массу перегрузка m_i и сил трения в блоке?

www.klapanau.kr.ua

Лабораторная работа М-2

Изучение законов вращательного движения и определение моментов инерции тел

Для допуска к данной лабораторной работе курсанты должны уметь:

- дать определение вращательного движения тела и записать основное уравнение динамики вращательного движения;
- давать определения и объяснять физическое содержание всех величин, входящих в формулы, которые используются в работе;
- выводить конечную рабочую формулу;
- объяснять ход выполнения работы и физический механизм установки.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники и учебные пособия: В.В. Фоменко. «Курс загальної фізики. Модуль 1. Класична механіка», Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.1.

Цель работы: изучить закономерности вращательного движения абсолютно твердого тела, измерить момент инерции тела, исследовать зависимости момента инерции от распределения массы тела относительно оси вращения.

Оборудование: 1) маятник Обербека; 2) набор грузиков; 3) секундомер; 4) масштабная линейка; 5) штангенциркуль.

Краткие теоретические сведения

Движение абсолютно твердого тела называется **вращательным**, если все точки этого тела двигаются по окружностям, центры которых располагаются на одной прямой, называемой **осью вращения**.

Основной закон динамики вращательного движения в общем виде выражается формулой:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \vec{M}, \quad (1)$$

где $\vec{L}$ - вектор момента импульса вращающегося тела, $\sum \vec{M}$ - векторная сумма моментов сил, действующих на это тело.

Если тело вращается относительно некоторой **фиксированной неподвижной оси** z , уравнение (1) следует спроектировать на эту ось:

$$\frac{dL_z}{dt} = \sum M_z. \quad (2)$$

Величина проекции момента импульса тела на ось вращения $L_z = I_z \omega$, где I_z – момент инерции тела относительно оси вращения z , ω – угловая скорость вращения. Подставляя это выражение в формулу (2), имеем $\frac{d(I_z \omega)}{dt} = \sum M_z$. Если момент инерции тела не зависит от времени ($I_z = \text{const}$), его можно вынести из-под знака производной: $I_z \frac{d\omega}{dt} = \sum M_z$. Тогда, с учетом того, что $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$ (угловое ускорение вращающегося тела) имеем **закон динамики вращательного движения тела вокруг неподвижной оси**:

$$I_z \varepsilon = \sum M_z, \quad (3)$$

где $\sum M_z$ – сумма проекций на ось вращения z моментов всех сил, действующих на тело.

Экспериментальная проверка уравнения (3) является одновременно проверкой основных положений механики вращательного движения тела.

Из формулы (3) вытекает, что основными динамическими понятиями, используемыми при описании вращения тела, являются понятия **момента инерции** тела и **момента силы**, действующей на тело.

Момент инерции материальной точки массой m , движущейся по окружности радиусом r вокруг оси z , определяется по формуле:

$$I_z = mr^2 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (4)$$

Момент инерции тела (как системы материальных точек) определяется как сумма моментов инерций всех материальных точек относительно данной оси вращения:

$$I_z = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (5)$$

С учетом непрерывного распределения масс внутри тела суммирование в формуле (5) превращается в интегрирование по объему тела:

$$I_z = \int r^2 dm. \quad (6)$$

Физический смысл момента инерции заключается в том, что он является **мерой инертности** тела при его вращении вокруг данной оси.

Используя формулу (6), можно получить выражения для моментов инерции некоторых тел правильной геометрической формы:

- сплошного однородного цилиндра (диска) относительно оси симметрии:

$$I = \frac{mR^2}{2}, \quad (7)$$

(m – масса цилиндра; R – его радиус);

- сплошного однородного стержня относительно оси, которая проходит через середину стержня перпендикулярно его длине:

$$I = \frac{1}{12} ml^2, \quad (8)$$

(m – масса стержня; l – его длина);

- сплошного однородного шара относительно оси, которая проходит через его центр.

$$I = \frac{2}{5} mR^2, \quad (9)$$

(m – масса шара; R – его радиус).

В случае, когда ось вращения не проходит через центр масс тела, момент инерции тела можно найти с помощью **формулы Штейнера**:

$$I = I_0 + m \cdot d^2, \quad (10)$$

где I – момент инерции тела относительно некоторой оси, I_0 – момент инерции этого же тела относительно параллельной оси, проходящей через его центр масс, m – масса тела, d – расстояние между осями.

Моменты инерции тел неправильной формы, а также неоднородных тел вычислить аналогичным путем сложно, а иногда и невозможно. Их обычно определяют экспериментально.

Моментом силы $\vec{F}$ относительно точки О называется векторная величина $\vec{M}$, определяемая векторным произведением:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}], \quad (11)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор точки приложения силы (рис. 3.8).

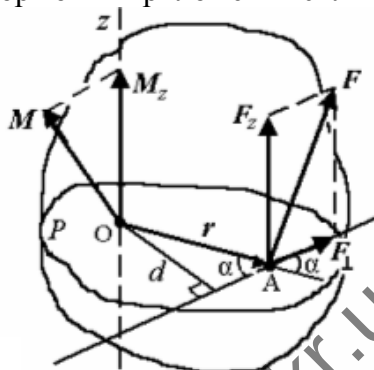


Рисунок 3.8 Момент силы

Если тело имеет фиксированную ось вращения z , то вращательное действие на тело оказывает не весь момент силы, а его проекция на эту ось вращения $\vec{M}_z$. Из рис 1 видно, что

$$\vec{M}_z = [\vec{r} \times \vec{F}_\perp], \quad (12)$$

где $\vec{F}_\perp$ – составляющая вектора силы $\vec{F}$, перпендикулярная оси вращения. Величина $M_z = \pm |\vec{M}_z|$ называется **моментом силы**

относительно оси вращения z . Знак «+» берется в случае, когда направление вектора $\vec{M}_z$ совпадает с направлением вектора угловой скорости вращения тела $\vec{\omega}$ (сила «помогает» вращению тела в данном направлении). В противном случае берется знак «-». Как следует из формулы (12) и рис. 3.8, $M_z = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}_\perp| \cdot \sin \alpha$. Введем величину $d = |\vec{r}| \cdot \sin \alpha$, которая называется **плечом силы $\vec{F}_\perp$** (длина перпендикуляра, опущенного из точки О на линию действия силы $\vec{F}_\perp$). Тогда

$$M_z = \pm |\vec{F}_\perp| \cdot d. \quad (13)$$

Физический смысл момента силы относительно данной оси M_z заключается в том, что он является **мерой вращательного воздействия силы** на тело при его вращении вокруг этой оси.

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка, которая используется в данной работе, исторически получила название «Маятник Обербека». Схема ее изображена на рис. 3.9. Установка состоит из четырех спиц, укрепленных на вращающемся барабане перпендикулярно друг другу. На спицах на равных расстояниях от оси вращения l закрепляются грузики. Расстояния l можно изменять, изменяя таким образом момент инерции системы. На барабан намотана нить, к концу которой прикрепляется небольшой груз. Этот груз, опускаясь вниз с некоторым постоянным ускорением $\vec{a}$, раскручивает барабан с угловым ускорением

$$\varepsilon = \frac{a}{R}, \quad (14)$$

где R – радиус барабана.

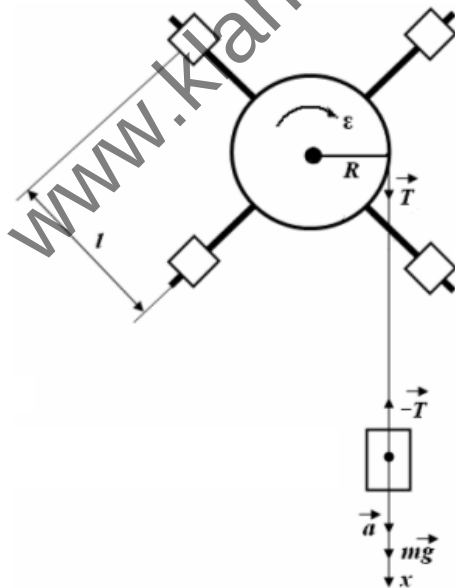


Рисунок 3.9 Маятник Обербека

Проанализируем движение маятника Обербека на основе законов динамики. Груз на нити движется вниз равноускоренно под действием силы тяжести $m\vec{g}$ (m – масса груза) и силы натяжения нити $-\vec{T}$. Уравнение второго закона Ньютона для движения этого груза в проекциях на вертикальную ось x имеет вид:

$$m \cdot a = m \cdot g - T. \quad (15)$$

Отсюда находим силу натяжения нити T :

$$T = m(g - a). \quad (16)$$

Величину ускорения a , с которым опускается груз можно определить, измерив путь h и время его движения t . Поскольку начальная скорость груза равна нулю, имеем:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (17)$$

Подставляя соотношение (17) в формулу (16), получим для силы натяжения нити:

$$T = m\left(g - \frac{2h}{t^2}\right). \quad (18)$$

Эта сила прилагается по касательной к поверхности барабана и создает момент силы $M = T \cdot R$, который и раскручивает барабан:

$$M = mR\left(g - \frac{2h}{t^2}\right). \quad (19)$$

Угловое ускорение вращения барабана определяется из формул (14) и (17):

$$\varepsilon = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (20)$$

Используя основной закон динамики вращательного движения в виде (3) и пренебрегая силами трения в оси барабана, получим для момента инерции барабана:

$$I = \frac{M}{\varepsilon} = mR^2\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right). \quad (21)$$

Ход работы

1. Измерить штангенциркулем диаметр барабана, определить его радиус и абсолютную погрешность его измерения. Результат

записать в виде $R = R_0 \pm \Delta R$. Закрепить на спицах грузики на метке, указанной преподавателем.

2. К концу нити прикрепить груз, массу m которого занести в табл.3.8

3. Секундомером определить время t опускания груза с высоты h . Повторить опыт не менее 3-х раз. Рассчитать среднее значение времени движения груза $t_{\text{ср}}$ и погрешность $\Delta t_{\text{ср}}$. Результаты занести в табл. 1.

4. По формулам (19) и (20) рассчитать значения момента силы M и углового ускорения ε . Оценить абсолютные погрешности измерений ΔM и $\Delta \varepsilon$. Результаты занести в табл.1.

5. По формуле (21) рассчитать момент инерции системы I . Результат расчета занести в табл. 1

6. Пп. (2-5) повторить с другими грузами, прикрепляемыми к концу нити (указанными преподавателем).

7. По результатам опытов с несколькими грузами, подвешиваемыми к концу нити:

- построить график зависимости углового ускорения системы от момента силы $\varepsilon = f(M)$, убедиться в линейном характере графика;

- рассчитать среднее значение момента инерции системы $I_{\text{ср}}$, оценить абсолютную погрешность $\Delta I_{\text{ср}}$.

8. Оформить отчет о работе.

Таблица 3.8

m груза	№ опыта	t	t_{cp}	Δt_{cp}	M	ΔM	ε	$\Delta \varepsilon$	I	I_{cp}	ΔI_{cp}		
	1												
	2												
	3												
	1												
	2												
	3												
	1												
	2												
	3												

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом силы относительно точки? Как определяется его направление и численное значение?
2. Что называется моментом силы относительно оси вращения? Как определяется его величина?
3. Записать формулы закона динамики вращательного движения в общем виде и при вращении тела относительно фиксированной оси.
4. Что называется моментом инерции тела? Как рассчитываются моменты инерции простых симметричных тел?
6. Записать формулу Штейнера. Каков смысл этой формулы?
7. Как определить момент инерции тела относительно произвольной оси, если известен момент инерции его относительно оси симметрии, которая параллельна этой оси?
8. Как можно определить момент инерции тела неправильной геометрической формы?
9. Как определить момент инерции маятника с грузами?
10. Какой вид должен иметь график функции $\varepsilon = f(M)$ при $I = \text{const}$?

Лабораторная работа М-3

Измерение момента инерции физического маятника

Для допуска к данной лабораторной работе курсанты должны уметь:

- дать определение понятия физического маятника;
- давать определения и объяснять физическое содержание всех величин, входящих в формулы, которые используются в работе;
- выводить конечную рабочую формулу.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники и учебные пособия: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: изучение колебаний физического маятника, измерение момента инерции физического маятника.

Оборудование: 1) физический маятник (плоская симметричная фигура из металла); 2) штатив; 3) секундомер; 4) линейка.

Краткие теоретические сведения и описание лабораторной установки

Моментом инерции твердого тела относительно некоторой оси называется физическая величина, характеризующая инертные свойства тела при его вращении вокруг этой оси.

Теоретически момент инерции тела определяется по формуле

$$I = \sum_i \Delta m_i r_i^2 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}, \quad (1)$$

(1) где суммирование проводится по всем частицам, из которых состоит тело, Δm_i – масса частицы, r_i – расстояние от этой частицы до оси вращения тела.

В пределе, когда массы частиц, на которые мысленно разбивают тело, стремятся к бесконечно малым величинам ($\Delta m \rightarrow dm$), а их количество стремится к бесконечности, суммирование в формуле (1) переходит в интегрирование по объему тела V :

$$I = \int_V r^2 dm. \quad (2)$$

Расчет момента инерции по формуле (2) возможен только для тел правильной формы (шара, цилиндра и др.). Для тел неправильной формы момент инерции можно измерить экспериментально. Одним из методов этого измерения является использование тела, момент инерции которого нужно определить, в качестве физического маятника.

Физический маятник называется твердое тело, совершающее под действием силы тяжести механические колебания вокруг неподвижной точки O , не совпадающей с центром масс тела C (рис. 3.10).

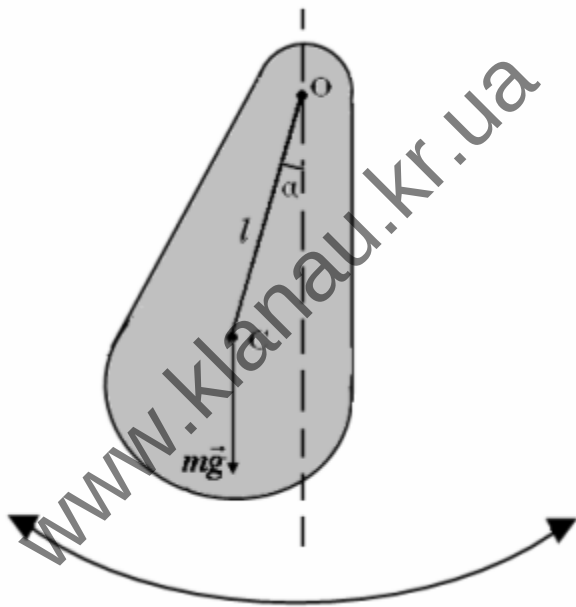


Рисунок 3.10 Физический маятник

Механические колебания это такие движения тела, при которых его положение в пространстве и характеристики движения повторяются через равные промежутки времени.

Важной характеристикой физического маятника является период его колебаний.

Периодом колебаний маятника называется промежуток времени, за который совершается одно полное колебание.

Как показывает теоретический анализ, период T колебаний физического маятника определяется по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}, \quad (3)$$

где I – момент инерции маятника относительно горизонтальной оси, проходящей через точку O , m – масса маятника, l – расстояние от оси вращения до центра масс маятника, $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Из формулы (3) следует, что момент инерции маятника равен:

$$I = \frac{T^2}{2\pi} mgl. \quad (4)$$

Эта формула является основой метода определения момента инерции маятника, используемого в настоящей работе. Для ее использования необходимо знать массу маятника m (обозначена на нем), расстояние l между точками O и C (см. рис.1 – измеряется линейкой) и период колебаний.

Период колебаний маятника можно определить, измерив с помощью секундомера промежуток времени t , за который маятник совершает определенное количество колебаний N . Тогда

$$T = \frac{t}{N}. \quad (5)$$

Подставив формулу (5) в уравнение (4), получим **рабочую формулу** для определения момента инерции маятника:

$$I = \frac{t^2}{2\pi N^2} mgl. \quad (6)$$

Ход работы

1. Записать в отчете о работе массу маятника в виде: $m = m_0 \pm \Delta m$.

2. Измерить линейкой расстояние l между точкой подвеса маятника O и его центром масс C (см. рис. 1). Результат записать в отчете в виде: $l = l_0 \pm \Delta l$.

3. Подвесить маятник на штативе. Отклонить маятник от вертикали на небольшой угол и отпустить. Пропустив 1-2

колебания пустить секундомер. Отсчитав $N = 15-20$ полных колебаний выключить секундомер. Зафиксировать в отчете число колебаний N и показания секундомера в виде: $t = t_0 \pm \Delta t$.

4. По формуле (6) рассчитать момент инерции маятника, а также его абсолютную и относительную погрешности. Результат записать в виде: $I = I_0 \pm \Delta I$.

5. Оформить отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом инерции тела относительно данной оси? По каким формулам он определяется? Каков его физический смысл?

2. Какие движения называются механическими колебаниями? Приведите примеры колебательных движений.

3. Что называется физическим маятником? Какие еще маятники существуют?

4. Что называется периодом колебаний? Запишите формулу для периода колебаний физического маятника.

5. Выведите рабочую формулу данной работы.

Лабораторная работа М – 4

Определение коэффициента вязкости методом Стокса

Для допуска к данной лабораторной работе курсанты должны уметь:

- записать и объяснить физическое содержание уравнения Ньютона, формулы Стокса;
- объяснить физическое содержание, указать единицы измерения всех величин, входящих в формулы, рассматриваемые в данной работе;
- выводить конечную рабочую формулу;
- объяснять ход выполнения работы и ее физическое содержание.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебное пособие В.В. Фоменко «Курс общей физики. Модуль 1. Классическая механика», учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.1.

Цель работы: изучение явления внутреннего трения и метода измерения коэффициента динамической вязкости методом Стокса, проведение измерений по этому методу.

Оборудование: 1) установка для определения вязкости по методу Стокса; 2) шарики; 3) микрометр; 4) секундомер; 5) линейка.

Краткие теоретические сведения

Все реальным жидкостям и газам присуща вязкость (внутреннее трение).

Вязкость (внутреннее трение) — это свойство реальных сплошных сред (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной части среды относительно другой.

Явление вязкости в жидкостях и газах можно описывать следующим образом. Пусть два слоя жидкости или газа (рис.3.11), отстоящие друг от друга на расстоянии dz , имеют скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + d\vec{v}$. Со стороны слоя, который движется быстрее, на

слой, который движется медленнее, действует ускоряющая его сила. Соответственно, на быстрый слой действует тормозящая сила со стороны медленного слоя. Эти силы, направленные по касательной к поверхности слоя, называются **силами внутреннего трения**. Они тем больше, чем больше площадь соприкасающихся слоев, и зависят от разности скоростей течения жидкости (газа) при переходе от слоя к слою.

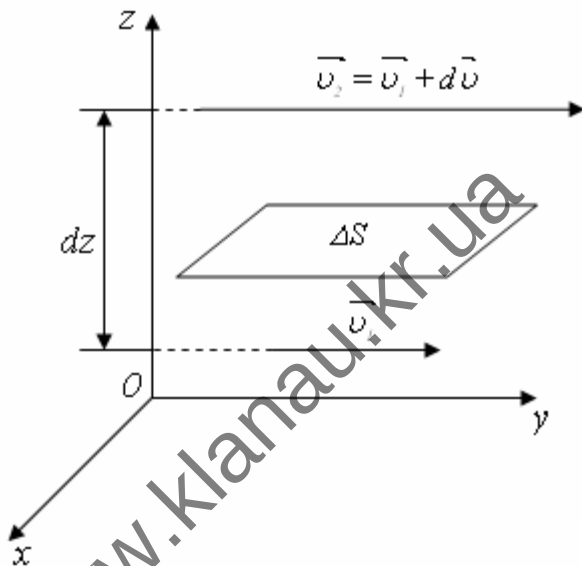


Рисунок 3.11

Сила внутреннего трения между слоями жидкости определяется по формуле :

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} \Delta S, \quad (1)$$

где величина $\frac{dv}{dz}$ показывает, как быстро меняется скорость движения среды при переходе от слоя к слою в направлении z , перпендикулярном направлению скоростей слоев. Эта величина называется **градиентом скорости**.

В формуле (1) ΔS – площадь соприкосновения слоев; η – коэффициент динамической вязкости среды (жидкости или газа),

численно равный силе трения, возникающей между слоями этой среды на единичной площади, при градиенте скорости, равном единице.

Выражение (1) называется **уравнением Ньютона** для вязкости.

Единицей коэффициента динамической вязкости в системе единиц СИ является паскаль-секунда (Па·с): 1 Па·с равен динамической вязкости среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости, по модулю равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения в 1 Н на 1 м² площади соприкосновения слоев.

Для жидкостей, течение которых подчиняется уравнению (1), коэффициент динамической вязкости не зависит от градиента скорости течения. Такие жидкости называются **ньютоновскими**, а вязкость – **нормальной**. Жидкости, не подчиняющиеся уравнению (1), называются **неньютоновскими**, а их вязкость **аномальной**. К неньютоновским относятся жидкости, состоящие из сложных и крупных молекул, например растворы полимеров. Неньютоновской жидкостью является и кровь, так как содержит белки и клетки крови, представляющие собой сложные структурированные образования.

Коэффициент вязкости в общем случае зависит от природы жидкости или газа, а также от температуры. При этом при повышении температуры вязкость газов увеличивается, а жидкостей – уменьшается.

При движении тела в вязкой среде возникают силы сопротивления. При небольших скоростях движения тела в среде, при которых за телом не образуются завихрения (т. е. течение среды при обтекании тела является ламинарным), сила сопротивления среды определяется ее вязкостью. Слои среды, прилегающие к движущемуся в ней телу, увлекаются этим телом. При этом между этими слоями и более удаленными от поверхности тела слоями среды возникают силы внутреннего трения.

Согласно **закону Стокса** при движении тела сферической формы (шара) в вязкой среде с небольшой скоростью, сила сопротивления действующая на тело со стороны среды равна:

$$\vec{F}_c = 6\pi R\eta \vec{v}, \quad (2)$$

где R – радиус шара, $\vec{v}$ – его скорость, а η – коэффициент динамической вязкости жидкости. Знак « $\leftarrow$ » указывает на то, что сила Стокса направлена против скорости движения шара.

На использовании этой формулы базируется метод измерения коэффициента динамической вязкости, называемый **методом Стокса**.

На шарик, падающий в вязкой жидкости, действуют три силы (рис. 3.12) – сила тяжести $\vec{F}_T$ направленная вниз, выталкивающая сила (сила Архимеда) $\vec{F}_A$, направленная вверх и сила сопротивления (сила Стокса) $\vec{F}_C$ направленная против движения, то есть также вверх.

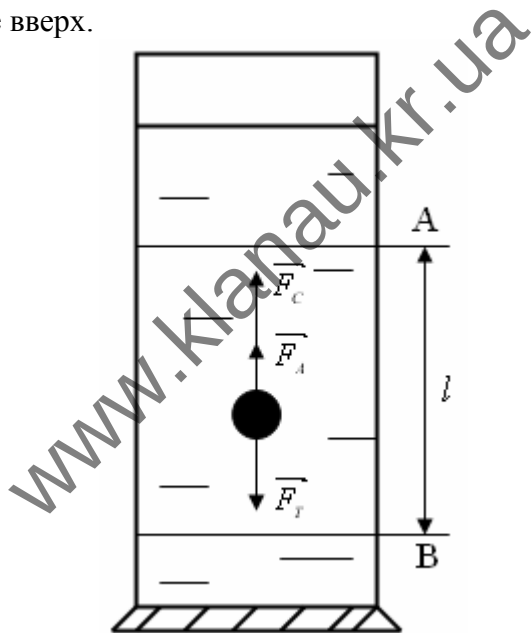


Рисунок 3.12

Если опустить шарик в жидкость, то он вначале будет двигаться ускоренно. С ростом скорости шарика сила Стокса будет расти в соответствии с формулой (2) до тех пор, пока эта сила в сумме с силой Архимеда не уравновесит силу тяжести, и движение шарика не станет равномерным. При равномерном движении

шарика выполняются условие равновесия сил. В проекции на направление движения шарика оно имеет вид:

$$F_T - F_A - F_C = 0 \quad (3)$$

Величину силы тяжести F_T можно определить, зная плотность материала шарика $\rho_{ш}$ и радиус шарика R , по формуле:

$$F_T = mg = \rho_{ш} V g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ш} g. \quad (4)$$

Величину силы Архимеда определяем, зная плотность жидкости $\rho_{ж}$:

$$F_A = \rho_{ж} g V = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ж} g \quad (5)$$

Подставляя в (3) выражения (2), (4), (5) получим:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ш} g - \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ж} g - 6 \pi \eta R v = 0 \quad (6)$$

Решение уравнения (6) относительно величины η дает;

$$\eta = \frac{2R^2 g (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{9v} \quad (7)$$

Величину скорости движения шарика в жидкости (считая это движение равномерным) можно определить, измерив время t прохождения шариком некоторого расстояния l :

$$v = \frac{l}{t}. \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в формулу (7), с учетом того, что $R = \frac{d}{2}$ (где d – диаметр шарика), получим **рабочую формулу** для определения коэффициента динамической вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{d^2 g (\rho_{ш} - \rho_{ж}) t}{18l}. \quad (9)$$

Описание лабораторной установки

Для определения вязкости по методу Стокса берут высокий цилиндрический сосуд и наполняют его исследуемой жидкостью (жидким маслом, см. рис. 3.12). На сосуде имеются две кольцевые метки A и B . Метка A соответствует той высоте, где силы,

действующие на шарик, уравнивают друг друга и движение становится равномерным. Нижняя метка В нанесена для удобства отсчета времени.

Ход работы

1. Измерить микрометром диаметр шарика три раза.
2. Вычислить средний диаметр шарика и его абсолютную погрешность.
3. Измерить расстояние l между метками. Оценить величину Δl .
4. Бросить шарик в сосуд с жидкостью. Измерить время t прохождения шариком расстояния между метками А и В. Оценить абсолютную погрешность измерения Δt .
5. Вычислить коэффициент вязкости η жидкости по формуле (9).
6. Повторить аналогичные измерения с другими шариками. Найти среднее значение коэффициента вязкости $\eta_{\text{ср.}}$ и абсолютную погрешность $\Delta \eta$.
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.9

Таблица 3.9

№ п/п	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	$d_{\text{ср}}$	Δd	t , с	Δt	l , м	Δl	η , Па·с	$\eta_{\text{ср.}}$, Па·с	$\Delta \eta$, Па·с
1												
2												
3												
4												

8. Оформить отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. Дать определение силы внутреннего трения.
2. Записать уравнение Ньютона для внутреннего трения в вязкой среде.

3. Как зависит вязкость жидкости от температуры?
4. Что такое ньютоновская и неньютоновская жидкости?
5. Вывести формулу для определения коэффициента динамической вязкости жидкости по методу Стокса.
6. Какова размерность коэффициента динамической вязкости, выраженная в основных единицах системы единиц СИ?
6. Какие условия должны выполняться при измерении вязкости методом Стокса?

www.klapau.kr.ua

Лабораторная работа Т-1

Определение коэффициента Пуассона воздуха по способу Клемана и Дезорма

Для допуска к работе курсант должен уметь:

- перечислить основные параметры газа, которые описывают его состояние, и записать уравнение Менделеева-Клайперона для идеального газа;
- записать уравнение первого начала термодинамики и применить его к изопроцессам в газе;
- записать формулы, определяющие понятия удельной и молярной теплоемкостей вещества, записать уравнение Р. Майера;
- дать определение адиабатического процесса, записать первое начало термодинамики для адиабатического процесса, уравнение Пуассона.

Цель работы: определение коэффициента Пуассона γ атмосферного воздуха, т.е. отношения молярной теплоемкости воздуха при постоянном давлении C_P к его молярной теплоемкости при постоянном объеме C_V ($\gamma = C_P / C_V$).

Для подготовки к работе кроме настоящих методических указаний рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.1, В.В. Фоменко «Курс физики. Модуль 2. Молекулярная физика и термодинамика».

Оборудование: стеклянный баллон с жидкостный манометром, насос, гидростатический клапан, кран, соединительные трубки.

Краткие теоретические сведения

Теплоемкостью вещества называют физическую величину, равную количеству тепла, необходимого для нагревания вещества на один градус 1°C (или на 1 K).

$$C = \frac{dQ}{dT} \left(\frac{Дж}{К} \right), \quad (1)$$

где dQ – бесконечно малое количество тепла, полученное веществом,

dT – бесконечно малое изменение его температуры.

Теплоемкость зависит от массы нагреваемого тела. Теплоемкость 1 кг вещества называют его **удельной теплоемкостью** c_y :

$$c_y = \frac{dQ}{m \cdot dT} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right). \quad (2)$$

Удельная теплоемкость численно равна количеству тепла, которое надо сообщить единице массы вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К (или 1 °С)

Теплоемкость 1 моля вещества называется его **молярной теплоемкостью** C_μ :

$$C_\mu = \frac{\mu \cdot dQ}{m \cdot dT} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right), \quad (3)$$

где μ – молярная масса вещества..

Молярная теплоемкость численно равна количеству тепла, необходимого для нагревания одного моля вещества на один градус.

Из соотношений (2) и (3) можно определить количество теплоты, получаемое или отдаваемое телом при изменении его температуры на величину ΔT :

$$\Delta Q = c_y \cdot m \cdot \Delta T = C_\mu \cdot \frac{m}{\mu} \Delta T. \quad (4)$$

При увеличении температуры тела ($\Delta T > 0$) это тело получает теплоту от внешних тел ($\Delta Q > 0$), при уменьшении температуры тела ($\Delta T < 0$) тело отдает теплоту внешним телам ($\Delta Q < 0$).

Связь молярной и удельной теплоемкостей определяется по формуле:

$$C_\mu = \mu \cdot c_y, \quad (5)$$

Важным уравнением, используемым для физического описания газов (и других термодинамических систем) является **первый закон термодинамики**. При малом изменении состояния системы (газа) он имеет вид:

$$dQ = dU + dA, \quad (6)$$

Количество теплоты dQ , сообщаемое системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии dU и на совершение этой системой работы dA над внешними телами (против внешних сил).

Для конечного (не малого) изменения состояния системы:

$$Q = \Delta U + A \quad (7)$$

Как видно из уравнения (6), количество теплоты, получаемое газом в ходе какого-либо процесса, а, значит и его теплоемкости, определяемые формулами (2) и (3), существенно зависят от условий нагревания, т.е. от вида процесса. У газов различают **теплоемкость при постоянном объеме** (C_V – молярная, c_V – удельная) – изохорная теплоемкость и **теплоемкость при постоянном давлении** (C_P – молярная, c_P – удельная) – изобарная теплоемкость.

Величина C_V определяется по формуле:

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (8)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, i – количество степеней свободы молекул газа. Для одноатомных молекул (например, He , Ar и др.) $i = 3$, для двухатомных молекул (O_2 , CO , HCl и др.) $i = 5$, для остальных (многоатомных) молекул (CH_4 , CO_2 и др.) $i = 6$.

Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении может быть определена из уравнения Р. Майера:

$$C_P = C_V + R, \quad (9)$$

откуда

$$C_P = \frac{i+2}{2} R. \quad (10)$$

Величина отношения теплоемкостей

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}, \quad (11)$$

называется **показателем адиабаты** или **коэффициентом Пуассона** газа. Из формул (9) и (10) получаем:

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (12)$$

Таким образом, для одноатомных газов $\gamma \approx 1,67$, для двухатомных (и, в частности, для **воздуха**) $\gamma = 1,4$, для многоатомных $\gamma \approx 1,33$.

Коэффициент Пуассона γ играет большую роль в описании **адиабатических процессов** в газе. Адиабатическим процессом

называется процесс, протекающий без теплообмена данной системы (газа) с окружающими телами, т. е. в условии полной теплоизоляции системы. Это означает, что в уравнении первого закона термодинамики (6) $dQ = 0$, и это уравнение для адиабатического процесса принимает вид:

$$dA = -dU. \quad (13)$$

Из первого начала термодинамики следует, что при адиабатическом процессе работа газа над внешними телами совершается за счет уменьшения его внутренней энергии. Например, если объем газа увеличивается (газ совершает работу над внешними телами), то внутренняя энергия газа уменьшается, т. е. уменьшается его температура. И, наоборот, при уменьшении объема газа, его температура возрастает.

Давление P и объем газа V в ходе адиабатического процесса связаны **уравнением Пуассона**:

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad (14)$$

где γ – показатель адиабаты, определяемый соотношениями (11), (12).

Описание установки

Для определения численного значения коэффициента Пуассона воздуха в данной работе используется метод, предложенный французскими физиками Н. Клеманом и Ш. Дезормом в 1819 г.

Установка для выполнения работы этим методом состоит из стеклянного баллона Б (рис. 3.13), соединенного с жидкостным (водяным) манометром М и с насосом Н, через кран К баллон Б соединяется с атмосферой. Выливание воды из манометра в процессе нагнетания воздуха в баллон предотвращает гидростатический клапан Г в виде сосуда с водой, в который опущен конец трубки Д. Если конец трубки Д находится на глубине h , то при достижении в баллоне давления, превышающего атмосферное на величину $\rho_v gh$ (где ρ_v – плотность воды), воздух, вытесняя воду из погруженной части трубки Д будет выходить через нижний конец этой трубки, и рост давления в баллоне прекратится

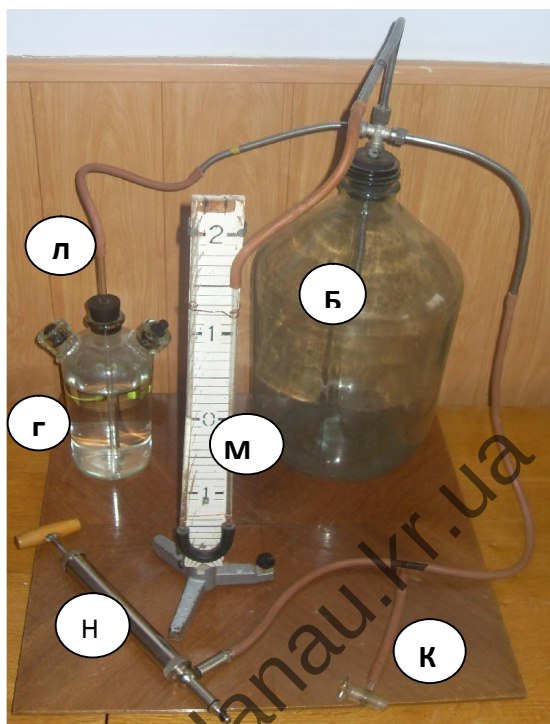


Рисунок 3.13

В начале работы кран К открыт, давление P_0 и температура воздуха T_0 в баллоне равны атмосферному давлению и температуре в лабораторном помещении.

Затем кран закрывается, и с помощью насоса в баллон накачивается воздух. Повышение давления в баллоне фиксируется манометром. Воздух в баллон следует накачивать до тех пор, пока разность уровней воды в коленях манометра не станет равной 15-20 см. Процесс сжатия воздуха в баллоне в результате накачивания дополнительного воздуха, вследствие его кратковременности можно считать **адиабатическим сжатием**. В результате этого процесса температура воздуха в баллоне несколько повысится.

После накачивания кран снова закрывается, и после этого наблюдается некоторое понижение давления воздуха в баллоне (которое фиксируется уменьшением разности уровней в коленях манометра), связанное с его охлаждением до температуры в

лаборатории. Когда температура воздуха станет равной температуре в лаборатории, разность уровней в манометре перестанет снижаться и достигнет некоторой величины h_1 . Давление в баллоне в этом состоянии равно (состояние 1):

$$P_1 = P_0 + \rho_{\text{в}} g h_1. \quad (15)$$

После этого производится следующая часть опыта – **адиабатическое расширение** газа в баллоне. Для этого открывается кран К, и газ резко выходит из баллона, вследствие чего разность уровней в коленях манометра быстро падает до нуля. Это означает, что давление в баллоне становится равным атмосферному давлению в лаборатории P_0 . В результате этого процесса температура воздуха в баллоне снижается и становится ниже температуры в лаборатории (состояние 2).

После закрытия крана воздух в баллоне будет прогреваться до температуры в лаборатории, при этом повышается давление в баллоне, что фиксируется возникновением и возрастанием разности уровней в коленях манометра. После завершения прогрева воздуха в баллоне, разность уровней перестанет увеличиваться и станет равной h_2 . В этом состоянии давление в баллоне будет равно (состояние 3):

$$P_2 = P_0 + \rho_{\text{в}} g h_2. \quad (16)$$

Для вывода формулы для определения коэффициента Пуассона γ мысленно выделим некоторую массу воздуха в баллоне, причем будем считать, что эта масса не меняется в ходе всех описанных процессах, а только меняет свой объем, давление и температуру. Рассмотрим три последовательных состояния этой массы.

Первое состояние – после накачивания воздуха в баллон и его охлаждения до открытия крана К:

V_1 – объем,

$P_1 = P_0 + \rho_{\text{в}} g h_1$ – давление,

T_0 – температура (равная температуре в лаборатории).

Второе состояние – сразу после адиабатического расширения воздуха в баллоне:

V_2 – объем,

P_0 – давление (равное атмосферному давлению в лаборатории),

T_2 температура ($T_2 < T_0$).

Третье состояние – после того, как температура в баллоне сравняется с температурой в лаборатории:

V_2 – объем,

$P_2 = P_0 + \rho_{\text{в}} g h_2$ – давление,

T_0 – температура (равная температуре в лаборатории).

Первое и третье состояние имеют одинаковую температуру, и их можно связать законом Бойля – Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (17)$$

Переход от первого состояния ко второму есть адиабатический процесс, и к нему применимо уравнение Пуассона (14) в виде:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (18)$$

Возведя обе части формулы (17) в степень γ и разделив ее почленно на (18), после преобразований получим:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma. \quad (19)$$

Прологарифмировав обе части этого уравнения, с учетом свойств логарифмов, имеем для величины γ :

$$\gamma = \frac{\ln P_1 - \ln P_2}{\ln V_1 - \ln V_2}. \quad (20)$$

Изменения давления в баллоне в процессе проведения опыта гораздо меньше величины атмосферного давления:

$\rho_{\text{в}} g h_1 \ll P_0$, $\rho_{\text{в}} g h_2 \ll P_0$, (21) поэтому давления P_1 и P_2 , определяемые из формул (15) и (16) близки друг другу и близки атмосферному давлению P_0 . Из свойств натуральных логарифмов следует, что отношение разностей логарифмов близких величин можно приближенно заменить отношением разностей самих величин. Используя это, из формулы (20) получим:

$$\gamma \approx \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_2}. \quad (22)$$

Тогда, с учетом формул (15) и (16) получаем **рабочую формулу** для определения коэффициента Пуассона воздуха:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (23)$$

Ход работы

Внимание: не применять больших усилий при повороте крана!

1. При закрытом кране К, сообщающим баллон с наружным воздухом, накачать некоторое количество воздуха в баллон, чтобы разность уровней в манометре составила $15 \div 20$ см ($150 \div 200$ мм).

2. Подождав некоторое время ($1 \div 2$ минуты), когда разность уровней жидкости в коленях манометра прекратит изменяться, записать эту разность уровней h_1 .

5. Снова открыть кран К, сообщающий баллон с наружным воздухом, на очень короткое время ($1 \div 2$ секунды), необходимое для того, чтобы уровни в манометре выровнялись, и сразу же его закрыть.

6. После закрытия крана разность уровней жидкости в манометре начинает медленно возрастать, и через некоторое время ($1 \div 2$ минуты) устанавливается неизменная разность уровней h_2 . Записать значение h_2 .

7. Вычислить коэффициент Пуассона γ по формуле (23).

8. Повторить измерения не менее 8 раз.

9. Рассчитать среднее значение $\gamma_{\text{ср}}$, абсолютную погрешность $\Delta\gamma_{\text{ср}}$ и относительную погрешность ε .

10. Результаты оформить в виде таблицы 3.10.

Таблица 3.10

№ изм.	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	γ	$\gamma_{\text{ср}}$	$\Delta\gamma$	$\Delta\gamma_{\text{ср}}$	ε
1							
...							
8							

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение понятий удельной и молярной теплоемкостей вещества.
2. Какая модель используется для воздуха в данной работе. Записать уравнение Менделеева – Клапейрона.
3. Сформулировать и записать первое начало термодинамики, записать его для изопроцессов в газе.
4. Какой процесс называется адиабатическим? Записать уравнение первого начала термодинамики для адиабатического процесса. Записать уравнение Пуассона.
5. Сформулировать определение теплоемкостей газов c_p и c_v и C_p и C_v . Записать уравнение Р. Майера. Объяснить почему теплоемкость газа зависит от способов (условий) нагревания?
6. Что называется коэффициентом Пуассона? Как он зависит от числа степеней свободы молекул газа?
7. Как и почему изменяется температура газа при адиабатическом расширении? Сжатии?
8. Объяснить принцип работы гидростатического клапана.

Лабораторная работа Э-1

Измерение омических сопротивлений с помощью моста постоянного тока

Для допуска к лабораторной работе курсанты должны уметь:

- сформулировать I и II законы Кирхгофа;
- выводить условия равновесия моста;
- дать понятие удельного сопротивления проводника;
- записать формулы расчета сопротивлений при последовательном и параллельном их соединении.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: изучить метод измерения сопротивлений при помощи мостовых схем; измерить неизвестные сопротивления мостиком Уитстона и выполнить проверку правил сложения этих сопротивлений при их последовательном и параллельном включении соединений.

Оборудование: мост постоянного тока типа МО-62 (или иного типа), набор неизвестных сопротивлений (R_1 и R_2), соединительные провода, калиброванная проволока, натянута на деревянной градуированной панели.

Краткие теоретические сведения

Определить сопротивление можно или с помощью вольтметра и амперметра, или методом сравнения. Методы сравнения с помощью мостовых схем широко используются для измерения параметров электрических цепей в измерительной технике. Эти методы имеют существенное преимущество и выделяются тем, что дают возможность измерять сопротивления с высокой точностью. Во-первых, не нужны такие измерительные приборы, как вольтметр и амперметр, что упрощает электрическую схему и устраняет погрешность, которую вносят эти измерительные приборы. Во-вторых, в мостовых схемах погрешность измерений

В этой охеме R_1, R_2, R_3, R_4 — сопротивления, которые называются плечами моста; E^* — источник тока; K — ключ, G — нульгальванометр, являющийся индикатором отсутствия тока в ветви BA при измерениях. Подбором сопротивлений R_1, R_2, R_3 и R_4 можно добиться того, чтобы разность потенциалов между узлами B и D была равна нулю, т.е. потенциалы точек B и D будут одинаковыми ($\varphi_B = \varphi_D$), а значит ток на участке BD будет равен нулю. В этом случае мост находится в равновесном состоянии (мост уравновешен). При уравновешенном мосте можно найти

любое неизвестное сопротивление, например R_1 , зная остальные R_2 , R_3 и R_4 . Для узлов A , B , C запишем **первое правило Кирхгофа**:

$$A: I - I_1 - I_4 = 0$$

$$B: I_1 - I_2 = 0 \quad (1)$$

$$C: I_2 + I_3 - I = 0$$

Направления токов указаны на рис. 1. Из этих уравнений следует, что: $I_1 = I_2$, а также: $I_3 = I_4$.

Второе правило Кирхгофа запишем для контуров:

$$\left. \begin{aligned} ABDA: I_1 R_1 - I_4 R_4 = 0 &\Rightarrow U_{AB} = U_{AD}, \text{ или } : I_1 R_1 = I_4 R_4 \\ BCDB: I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0 &\Rightarrow U_{BC} = U_{BD}, \text{ или } : I_2 R_2 = I_3 R_3 \end{aligned} \right\} (2)$$

$$ABCE^*A: I_1 R_1 + I_2 R_2 = E^*$$

Направления обхода контуров выбрано по часовой стрелке. На рис. 1 I_1 , I_2 , I_3 , I_4 – значения сил токов в сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 , R_4 . Из схемы также легко видеть, что при равновесии моста $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$.

Из соотношений (2) следует:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (3)$$

Это соотношение между сопротивлениями плеч моста физически **выражает** условие равенства потенциалов в узлах B и D , т.е. **условие равновесия моста**.

Пользуясь соотношением (3), можно определить любое из четырех сопротивлений, если известны остальные. Так, например,

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (4)$$

Описание монтажной схемы моста Уитсона и метода измерений

Монтажная схема моста Уитстона изображена на рис. 3.15. Во всех мостовых схемах индикатором тока служит нульгальванометр G магнитоэлектрической системы, чувствительностью по току

порядка 10^{-7} ампер/деление и со шкалой, нуль которой находится посередине. Шкала прибора снабжена зеркалом, что позволяет исключить погрешность, связанную с параллаксом.

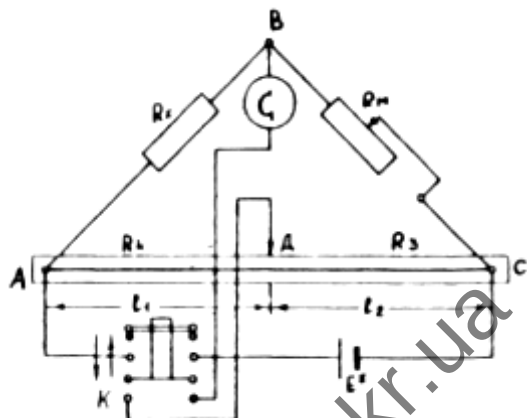


Рисунок 3.15 Рабочая схема моста Уитстона

В ветвь моста AB включается неизвестное сопротивление R_X , а в участок BC декадный магазин сопротивлений КМС-6. Отсчет по магазину сопротивлений равен сумме произведений цифр, стоящих против указателей декад на соответствующий множитель вводимой декады.

Деревянная панель с миллиметровой линейкой и натянутой проволокой AC с ползунком D образуют в целом **реоход**. Для удобства измерений неизвестных сопротивлений R_X , сопротивления R_3 и R_4 взяты в виде сопротивлений участков проволоки AC длиной в 1 метр.

Проволока AC делится подвижным контактом D ползунка на два отрезка l_1 и l_2 так, что $l_1 + l_2 = l$. Участку l_1 будет соответствовать сопротивление R_4 , а участку l_2 – сопротивление R_3 . Подбирая сопротивление магазина R_M и перемещая контакт D ползунка, можно добиться выполнения условия равновесия (4), которое запишется в виде

$$R_X = R_M \frac{R_4}{R_3} \quad (5)$$

Так как сопротивление участка однородной проволоки сечения S пропорционально его длине, то

$$R_4 = \rho \frac{l_1}{S} \text{ и } R_3 = \rho \frac{l_2}{S}, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проволоки. Тогда выражение (5) запишется в виде

$$R_X = R_M \frac{l_1}{l_2} = R_M \frac{l_1}{l - l_1}.$$

Здесь необходимо отметить, что погрешность измерения неизвестного сопротивления R_X будет меньшей в том случае, если подвижный контакт ползунка реохорда будет находиться посередине проволоки, т.е. если $l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$. Источником питания моста Уитстона служит аккумулятор (или сухой элемент) с ЭДС порядка 2,5 – 4,5 В.

Для включения источника питания и гальванометра применяют двойной кнопочный ключ K , который обеспечивает последовательность и кратковременность их включения. При нажатии кнопки вначале включается источник питания, а потом (через доли секунды) гальванометр. Это необходимо, так как в противном случае при неуравновешенном состоянии моста можно сжечь гальванометр из-за возникновения экстратоков самоиндукции. Кратковременность включения также необходима, так как длительное прохождение тока изменяет сопротивление плеч моста из-за нагрева последних.

Необходимо иметь в виду, что при монтаже моста Уитстона всегда будут влиять переходные сопротивления в различных контактах, а потому они могут привносить значительные погрешности в измерение.

На практике для измерений сопротивлений применяют специальные приборы — мосты постоянного тока (типа МВУ-49, МО-62 и др.). Принципиальная схема такого моста изображена на рис. 3.16. Она по существу ничем не отличается от схемы моста Уитстона. Вместо сопротивления R_2 в этих приборах вмонтирован

магазин сопротивлений с различным количеством декад. Вместо сопротивлений R_3 и R_4 используется реохорд и на панели прибора указывается отношение его плеч. Переключатель отношения R_4/R_3 этих плеч и вмонтированный магазин сопротивлений обеспечивают подбор сопротивления для достижения условия равновесного состояния моста. Измеряемые сопротивления подключаются к клеммам R_X .

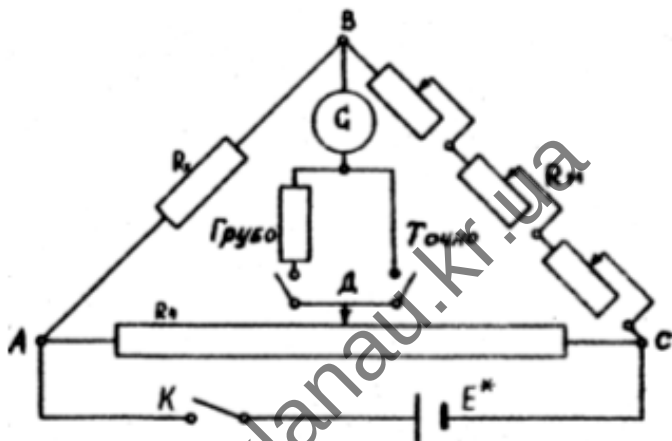


Рисунок 3.16 Принципиальная схема моста МО-62

Для предупреждения порчи нульгальванометра прибора в последнем имеются два ключа: "Грубо" и "Точно". При нажатии кнопки "Грубо" включают гальванометр с последовательно соединенным сопротивлением, вмонтированным в измерительную схему. Подбором сопротивления магазина моста добиваются установки стрелки гальванометра на нулевом делении. (Таким образом приближаются к уравновешенному состоянию моста). После этого нажимают кнопку "Точно". При этом гальванометр включается в схему без сопротивления. Тогда небольшим изменением сопротивлений магазина добиваются уже более точного равновесия моста. Естественно, что нажатие кнопок "Грубо" и "Точно" должно быть кратковременным. Переходные сопротивления в заводских мостах строго ограничены, что позволяет вести измерения с большей точностью. При

использовании моста измеряемое сопротивление вычисляется по формуле

$$R_X = R_M N, \quad (8)$$

где $N = \frac{R_4}{R_3}$ – берется по указателю переключателя отношений плеч моста.

Электрическая схема моста МО-62, используемого в данной работе для измерения сопротивлений, изображена на рис. 3.17.

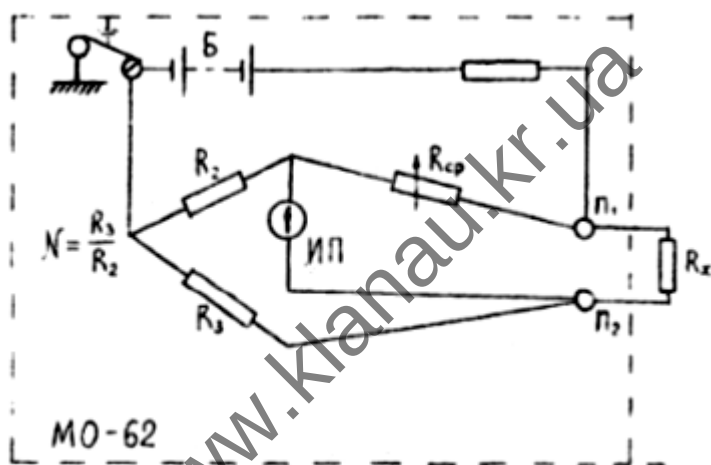


Рисунок 3.17 Электрическая схема МО-62

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из моста постоянного тока МО-62, резисторов R_1 и R_2 , калиброванной проволоки. На панели моста смонтированы:

- 1) гальванометр магнитоэлектрической системы;
- 2) шесть декадных переключателей, собранных на отдельных прессованных основаниях;

Пять из этих переключателей с катушками сопротивления, соединенными последовательно, образуют рычажный магазин, служащий одновременно плечом сравнения моста.

На шестом переключателе "N" установлено 11 катушек сопротивления, которые соединены последовательно и образуют "плечи отношения" моста.

3) переключатель питания моста "ПП", имеющий 5 фиксированных положений:

а) "БН" - батарея наружная;

б) $\left. \begin{array}{l} 1,5 \text{ В} \\ 9 \text{ В} \end{array} \right\}$ "БВ" - батареи питания моста внутренние;

в) $\left. \begin{array}{l} 1,5 \text{ В} \\ 36 \text{ В} \end{array} \right\}$ сеть – питание моста от сети переменного тока (через

трансформатор и выпрямитель).

4) Переключатель "сеть" – для включения схемы приборов в сеть переменного тока.

5) "Пр" - предохранитель на два положения – 127 В и 220 В.

6) Сигнальная лампочка, сигнализирующая о включении прибора в сеть.

7) Две кнопки "Грубо" и "Точно" для последовательного включения источника питания и гальванометра.

8) Переключатель схемы "ПС" на 4 фиксированных положения:

"МП" - метод петли;

"ЗИ" - метод трёх измерений;

"2З" - двухзажимная схема измерения;

"ЧЗ" - четырехзажимная схема измерения.

9) Гнездо для включения штепсельной вилки шнура для питания прибора от сети.

10) Переключатель гальванометра "ГВ-ГН", имеющий два фиксированных положения, позволяющий подключать к схеме прибора внутренний или наружный гальванометры.

11) Зажимы "П₁", "Т₁", "Т₂", "П₂" используются для подключения измеряемого сопротивления по двух- и четырехзажимной схеме включения.

12) Зажим " " используется для заземления прибора при питании его от сети переменного тока, а также для защиты от влияния токов утечки при измерении сопротивлений $10^4 \div 10^6$ Ом.

Ход работы

Измерение сопротивлений от 10 до 10^6 Ом.

1. Измеряемое сопротивление подключают согласно принципиальной схеме (рис. 3.17).
2. Переключатель схемы "ПС" устанавливают в положение "23".
3. На переключателе плеч отношения "N" устанавливают выбранный множитель (см. табл. 3.11).
4. Переключатель питания моста "ПП" устанавливают в положение 36 В.

Таблица 3.11

№ п/п	измеряемое сопротивление, Ом	N	сеть
1	$10 \div 10^2$	1	36
2	$10^2 \div 10^3$	1	36
3	$10^3 \div 10^4$	10	36
4	$10^4 \div 10^5$	100	36
5	$10^5 \div 10^6$	1000	36

5. При нажатой кнопке "Грубо" вращением рукоятки переключателей "X100", "X10", "X1", "X0,1", "X0,01" устанавливают гальванометр на ноль.

6. При нажатой кнопке "Точно" вращением переключателей магазина устанавливают гальванометр на ноль.

7. Вычисляют неизвестное сопротивление R_X по формуле (9)

$$R_X = R_{\text{сп}} \times N, \quad (9)$$

которая идентична формуле (4).

8. Результаты измерений записывают в табл. 3.12

9. Опыт повторяют трижды.

10. Рассчитывают относительную погрешность измерений R_X по формуле (10)

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} 100\% \quad (10)$$

Таблица 3.12

№ п/п	R_{X1}	ΔR_{X1}	R_{X2}	ΔR_{X2}	Последов. соедин.		Параллел. соедин.	
					R_{01}	ΔR_{01}	R_{02}	ΔR_{02}
1								
2								
3								
Ср. зн.								

11. Рассчитывают абсолютную погрешность измерений

$$\Delta R_X = \varepsilon R_X \quad (11)$$

12. Рассчитывают общее значение сопротивления проводников при последовательном и параллельном соединениях

$$R_{X\text{посл}} = R_{X1} + R_{X2} + R_{X3}, \quad (12)$$

$$R_{X\text{пар}} = \frac{R_{X1} R_{X2} R_{X3}}{R_{X1} R_{X2} + R_{X2} R_{X3} + R_{X1} R_{X3}} \quad (13)$$

13. Сравнивают измеренные и рассчитанные значения общего сопротивления, определив разницу

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{\text{посл}} &= R_{\text{посл.т}} - R_{\text{посл.в}}; \\ \Delta R_{\text{пар}} &= R_{\text{пар.т}} - R_{\text{пар.в}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

14. Анализируют и комментируют результаты сравнения (14).

Дополнительное задание

Определение удельного сопротивления металлического проводника.

Удельное сопротивление материала является основной характеристикой его электрических свойств. Удельное сопротивление ρ однородного проводника цилиндрической формы выражается формулой

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4l} R, \quad (15)$$

где d – диаметр, l – длина проводника, R – его сопротивление.

1. Измеряемое сопротивление подключают согласно схеме (рис. 3.18)

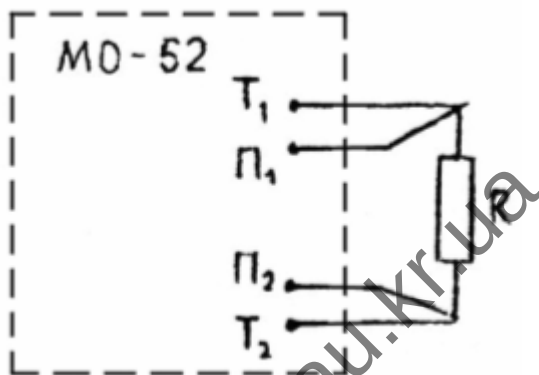


Рисунок 3.18

2. Переключатель схемы "ПС" устанавливают в положение "ЧЗ".

3. Переключатель питания моста "ПП" устанавливают в положение 1,5В.

4. На переключателе плеч отношений "N" устанавливают выбранный множитель (см. табл. 3.11).

5. Выполняют действия, указанные в п.5–п.9, задания 1. Результаты измерений записывают в табл. 3.14.

6. Измеряют длину проводника.

Таблица 3.13

№ п/п	измеряем. сопрот. Ом	N
1	0,01-0,1	0,001
2	0,1-1,0	0,01
3	1-10	0,1

7. Измеряют диаметр проводника.
8. Вычисляют удельное сопротивление проводника по формуле (15).
9. Вычисляют погрешности измерений.
10. Идентифицируют материал проводника.

Таблица 3.14

№ п/п	R	ΔR	l	Δl	d	Δd	ρ	$\Delta \rho$
1								
2								
3								
Ср. зн.								

Контрольные вопросы

1. Какими преимуществами обладает определение сопротивлений методом мостовых схем по сравнению с методом амперметра и вольтметра?
2. Как формулируются I и II законы Кирхгофа?
3. Каковы условия равновесия моста?
4. Выведите условие равновесия моста, пользуясь законом Ома и законами Кирхгофа.
5. Что дает применение гальванометра с нулем посередине шкалы при измерении сопротивлений методом мостовых схем?
6. Что называется удельным сопротивлением проводника и от чего оно зависит?
7. Чему равно общее сопротивление проводников, соединенных последовательно?, параллельно?
8. Опишите метод и экспериментальную установку.
9. Сформулируйте порядок выполнения работы.

Лабораторная работа Э-3

Определение горизонтальной составляющей земного магнитного поля с помощью тангенс-гальванометра

Для допуска к лабораторной работе курсанты должны уметь:

- сформулировать понятия магнитного меридиана, магнитного экватора;
- сформулировать понятия магнитного склонения и наклонения;
- выводить рабочую формулу для расчета горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в данной работе.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: изучить основные параметры магнитного поля Земли, изучить элементы земного магнетизма, определить горизонтальную составляющую индукции и напряженности магнитного поля Земли.

Оборудование: 1) тангенс-буссоль; 2) источник постоянного тока; 3) переключатель; 4) амперметр на 1,5 – 2 А; 5) реостат со скользящим контактом; 6) соединительные провода.

Краткие теоретические сведения

Земля представляет собой естественный магнит, полюса которого располагаются недалеко (~ 300 км) от географических полюсов.

Магнитный полюс Земли, который расположен на севере, называется южным магнитным полюсом (S), другой, соответственно на юге - северным магнитным полюсом (N).

Примечание. В настоящее время часто употребляются термины: южный геомагнитный полюс (тот, который находится на юге, в Антарктиде – северный магнитный) и северный геомагнитный полюс (на севере близ Канады – южный магнитный).

Через каждую точку *A* на поверхности Земли можно провести **магнитный меридиан** – дугу большого круга проходящую через эту

точку и магнитные полюса Земли (линия S–N на рис.3.19) и **географический меридиан** – дугу большого круга, проходящую через эту точку и географические полюса (линия С – Ю на рис.3.19). Угол между направлениями географического и магнитного меридианов называют углом **магнитного склонения** Δ – (рис.3.19, а).

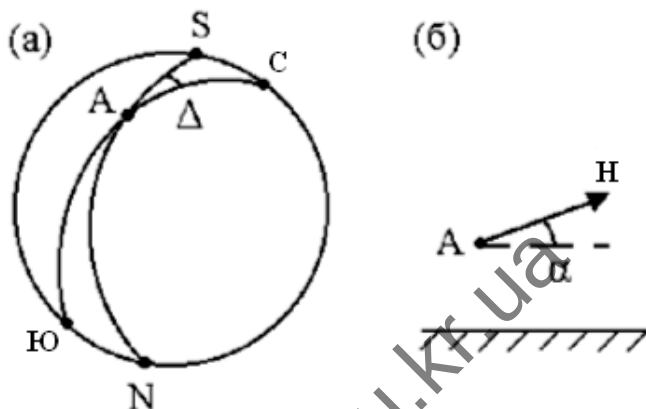


Рисунок 3.19 Магнитное склонение (а)
и магнитное наклонение (б)

Углом **магнитного наклонения** α называют угол между направлением вектора напряженности магнитного поля в данной точке и горизонтальной плоскостью (рис.3.19, б).

Эти углы (склонение и наклонение) называют **элементами земного магнетизма**.

Таким образом, напряженность магнитного поля в данной точке наклонна, т.е. имеет **горизонтальную** H_r и **вертикальную** H_v составляющие. Магнитная стрелка (например, стрелка компаса), вращающаяся свободно на закрепленной вертикальной оси, устанавливается в плоскости магнитного меридиана под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Если с помощью кругового электрического тока вблизи стрелки создать еще одно магнитное поле, то стрелка установится по направлению равнодействующей напряженности обоих магнитных полей. Так как поле кругового тока нетрудно вычислить, зная величину тока, то горизонтальную составляющую

земного магнитного поля можно определить по углу отклонения стрелки и напряженности поля тока.

Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли производится с помощью прибора, называемого **тангенс-буссолью** или **тангенс-гальванометром**. Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса r с некоторым числом витков N . В центре катушки помещена небольшая магнитная стрелка (компас). При достаточно большом радиусе проводника можно считать, что магнитная стрелка находится в однородном магнитном поле.

Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет ориентирована вдоль магнитного меридиана. Поварачивая катушку около вертикальной оси, можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана.

При прохождении тока I по виткам катушки напряженность магнитного поля H , создаваемого этим током в центре катушки, может быть определена по формуле:

$$H = \frac{I}{2r} N \quad (1)$$

где I – ток в амперах, r – радиус витка в метрах, N – количество витков.

После установки катушки в плоскости магнитного меридиана Земли и пропускания тока в витках горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли H_d и напряженность поля тока в витках H_B , в центре катушки окажутся перпендикулярными друг другу (рис. 3.20).

Как видно из рис.3.20

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H_B}{H_\Gamma} , \quad (2)$$

откуда

$$H_\Gamma = \frac{H_B}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (3)$$

Подставляя формулу (1) в (3) получим **рабочую формулу** для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

$$H_r = \frac{I}{2r \operatorname{tg} \varphi} N \quad (4)$$

Описание лабораторной установки

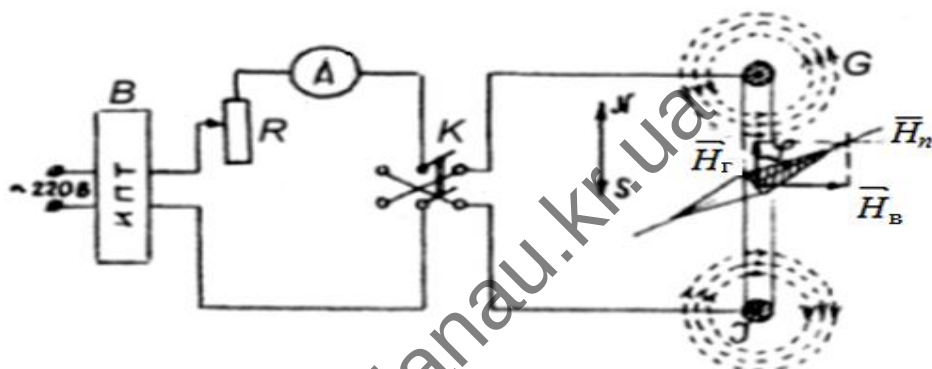


Рисунок 3.20

Лабораторная установка состоит из: 1) тангенс-гальванометра G; 2) амперметра A; 3) реостата R; 4) источника постоянного тока ИПТ; 5) переключателя направлений тока K.

Ход работы

1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, приведенной на рис.3.20. Переключатель K используется для изменения направления тока, проходящего через тангенс-гальванометр.

2. Установить плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана. При этом стрелка компаса должна установиться на нулевое деление шкалы.

3. При помощи реостата установить значение силы тока в цепи равное 0,5 А и отсчитать угол φ , поворота стрелки тангенс-гальванометра.

4. Не меняя величины тока I, изменить переключателем его

направление и измерить величину нового отклонения стрелки – угол φ_2 . Данные записать в таблицу 1.

5. Определить среднее значение углов отклонения стрелки тангенс-гальванометра.

6. Повторить опыт для различных значений тока. Величину тока изменяют, меняя положение ползунка на реостате.

7. Для каждого значения тока вычислить среднее значение угла отклонения стрелки $\varphi_{\text{ср}}$.

8. Используя калькулятор найти значения $\text{tg } \varphi_{\text{ср}}$.

9. По формуле (3) вычислить горизонтальную составляющую H_r магнитного поля Земли. Результаты занести в табл. 3.15.

10. Вычислить среднее значение H_r (в А/м).

11. Определить абсолютную и относительную погрешности измерений. Результат записать в виде:

$$H_r = (H_{r.\text{ср}} \pm \Delta H_r) \text{ А/м.}$$

Таблица 3.15

№ п/п	Сила тока, I , мА	Угол отклонения φ_1	Угол отклонения φ_2	Сред. знач. угла $\varphi_{\text{ср}}$	$\text{tg } \varphi$	Кол-во витков, N	Радиус рамки R , м	H_a , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	ΔH_a , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	ε , %
1.	0,5									
2.	0,6									
3.	0,7									
4.	0,8									
5.	0,9									
Средн. Знач.										

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой магнитная индукция и напряженность магнитного поля. В каких единицах они измеряются?

2. Что называют магнитным меридианом?
3. Какой угол называют углом магнитного склонения?
4. Какой угол называют углом магнитного наклона?
5. Сформулировать и записать закон Био-Савара-Лапласа.
6. Записать формулы напряженности и индукции магнитного поля, создаваемого круговым витком с током в его центре.
7. Вывести рабочую формулу данной работы.

www.klapau.kr.ua

Лабораторная работа Э-4

Определение индуктивности катушки

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- записать уравнение закона самоиндукции;
- сформулировать понятие индуктивности;
- выводить рабочую формулу для определения индуктивности катушки в данной работе.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: ознакомление с одним из методов измерения индуктивности катушки.

Оборудование: генератор синусоидального напряжения типа ГЗМ; дроссельная катушка; вольтметр; амперметр; соединительные провода.

Краткие теоретические сведения

Если в проводнике изменяется сила тока, то в нём возникает электродвижущая сила (э.д.с.) самоиндукции, препятствующая этому изменению. Э.д.с. самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности L называется **коэффициентом самоиндукции** или **индуктивностью** и зависит от формы и размеров проводника и от магнитной проницаемости среды. Индуктивность численно равна э.д.с. самоиндукции, возникающей в проводнике при скорости изменения силы тока 1 А/с. В системе СИ индуктивность измеряется в генри (Гн). Индуктивностью в 1 Гн обладает такой проводник, в котором изменение силы тока со скоростью 1 А в 1 с вызывает э.д.с. самоиндукции в 1 В. У линейных проводников индуктивность очень мала. Большими коэффициентами самоиндукции обладают

так называемые катушки индуктивности, состоящие из большого числа витков.

Пусть омическое сопротивление проволоки, из которой намотана катушка, равно R . Это сопротивление часто называют **активным**. Если включить такую катушку в цепь переменного тока, то вследствие периодического изменения силы тока возникает э.д.с. индукции, препятствующая приложенному напряжению. Это приводит к тому, что сопротивление катушки становится больше, чем активное. Иначе говоря, катушка индуктивности будет обладать не только активным, но и **индуктивным** сопротивлением X_L .

Пусть катушка индуктивности включена в цепь переменного напряжения:

$$U = U_0 \sin \omega t \quad (2)$$

В этом случае катушку можно представить в виде последовательно соединенных активного R и индуктивного X_L сопротивлений (рис.3.21).

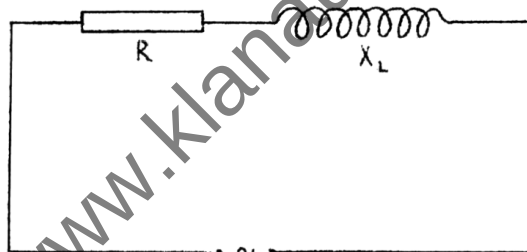


Рисунок 3.21

По второму закону Кирхгофа для контура на рис.1 падение напряжения на омическом сопротивлении R равно сумме электродвижущих сил в этом контуре:

$$IR = U_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt}. \quad (3)$$

Запишем уравнение (3) в виде

$$L \frac{dI}{dt} + IR = U_0 \sin \omega t \quad (4)$$

Решение этого дифференциального уравнения будем искать в виде

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где φ — разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения в данном контуре.

Подстановка формулы (5) в уравнение (4) дает:

$$LI_0 \omega \cos(\omega t + \varphi) + R I_0 \sin(\omega t + \varphi) = U_0 \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} L\omega I_0 [\cos \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \sin \varphi] + \\ + R I_0 [\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi] = U_0 \sin \omega t \end{aligned} \quad (6)$$

Записывая равенство (6) для $\omega t = 2\pi$ получим:

$$L I_0 \omega \cos \varphi + R I_0 \sin \varphi = 0$$

Поделим это уравнение на $\cos \varphi$:

$$L I_0 \omega + R I_0 \operatorname{tg} \varphi = 0$$

Соответственно тангенс сдвига фаз рассчитывается по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{L I_0 \omega}{R I_0} = -\frac{L \omega}{R} = -\frac{X_L}{R} \quad (7)$$

Записывая равенство (6) $\omega t = \frac{\pi}{2}$ получим:

$$-L I_0 \omega \sin \varphi + R I_0 \cos \varphi = 0 \quad (8)$$

поскольку

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_L^2}{R^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}},$$

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi \cos \varphi \left(-\frac{X_L}{R}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = -\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_L^2}{R^2}}} = -\frac{\omega L}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}},$$

то, подставляя эти значения в выражение (8), получим:

$$-LI_0\omega\left(-\frac{\omega L}{R}\right)\frac{1}{\sqrt{\frac{R^2+\omega^2L^2}{R^2}}}+\frac{RI_0}{\sqrt{\frac{R^2+\omega^2L^2}{R^2}}}=U_0,$$

$$\frac{I_0\omega^2L^2}{R}\cdot\frac{R}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}+\frac{R^2I_0}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}=U_0,$$

$$I_0\omega^2L^2+R^2I_0=U_0\sqrt{R^2+\omega^2L^2},$$

$$I_0(\omega^2L^2+R^2)=U_0\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$$

для упрощения данной формулы возведем ее в квадрат

$$I_0^2=\frac{U_0^2(\sqrt{R^2+\omega^2L^2})^2}{(R^2+\omega^2L^2)^2},$$

извлекая, квадратный корень получим формулу для определения амплитуды силы тока:

$$I_0=\frac{U_0}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}} \quad (9)$$

Величина $Z=\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$ называется **полным сопротивлением катушки**.

В большинстве случаев амперметры и вольтметры показывают не максимальные (амплитудные), а действующие значения I и U , которые для синусоидального тока и напряжения равны:

$$I=\frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U=\frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

Тогда выражение (9) можно записать в виде

$$I=\frac{U_0}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}} \quad (11)$$

Решив это уравнение относительно L , получим

$$L = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 R^2}}{I \omega} \quad (12)$$

Формула (12) является **рабочей формулой** для определения индуктивности катушки.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из генератора синусоидального напряжения типа ГЗМ, дроссельной катушки ДР, вольтметра и амперметра переменного тока, соединительных проводов. Принципиальная схема лабораторной установки изображена на рис. 3.22.

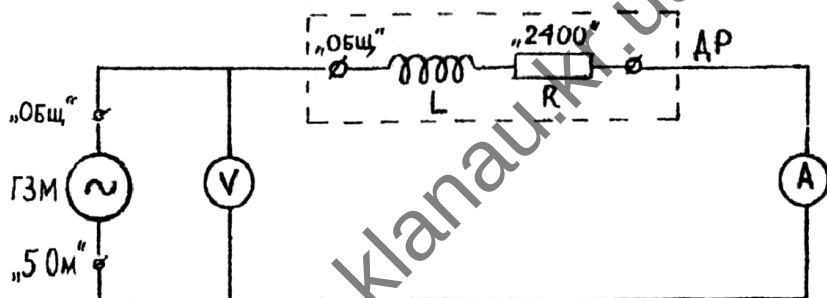


Рисунок 3.22

Ход работы

1. Записать значение омического сопротивления дроссельной катушки (указано на самой катушке).
2. Собрать цепь согласно схеме, изображённой на рис.3.22. При этом выходом генератора считать гнезда "I" и 5 Ом, входом дроссельной катушки считать гнезда "Общ." и "2400".
3. Проверить положение ручек управления на лицевой панели генератора. Они должны находиться в следующих положениях:
 - а) переключатель диапазонов - "×I";
 - б) "Усиление" - в крайнем левом положении;
 - в) Ручка установки частоты переменного напряжения должна располагаться так, чтобы шкала своим делением "20" находилась против штриха указателя.

4. После проверки схемы преподавателем и с его разрешения включить генератор в сеть переменного тока. Поставить тумблер включения сети в положение "Вкл.", при этом должна загореться сигнальная лампочка. Дать генератору прогреться в течение 3-5 мин.

5. Поворотом ручки "Усиление" вправо установить по вольтметру значение $U = 9\text{В}$ и поддерживать его постоянным в течение всего эксперимента.

6. Вращением ручки шкалы установить частоту выходного напряжения 50 Гц и записать показания амперметра.

7. П.6. повторить для значений $\nu = 60\text{ Гц}$; 100 Гц ; 200 Гц ; 300 Гц ; 400 Гц . Результаты измерений записать в табл.3.16.

8. Вычислить индуктивность L дроссельной катушки по формуле (12) для каждого значения ν . Окончательный результат записать в виде:

$$L = \bar{L} \pm \Delta\bar{L}.$$

Таблица 3.16

ν	50	60	100	200	300	400
ω	314	377	628	1257	1885	2513
I						
L						
ΔL						

9. Построить график зависимости $I = I(\omega)$.

Контрольные вопросы

1. В чём состоит сущность явления электромагнитной индукции, самоиндукции?

2. Записать закон самоиндукции.

3. Что называется индуктивностью? В каких единицах измеряется индуктивность?

4. Как формулируется правило Ленца для закона самоиндукции?

5. Вывести рабочую формулу данной работы.

6. Как связано явление самоиндукции с явлением электромагнитной индукции?

Лабораторная работа К-1

Изучение свободных механических колебаний

Для допуска к лабораторной работе курсанты должны уметь:

- дать определения понятия колебательного процесса, привести примеры колебательных систем (осцилляторов);
- сформулировать понятия моделей идеального осциллятора и затухающего осциллятора, указать общие и отличительные черты этих моделей, возможность их применения для описания колебательных процессов в реальных системах;
- сформулировать понятия, определяющие основные количественные характеристики колебательных систем и процессов: амплитуду, частоту, период, фазу колебаний, коэффициент и логарифмический декремент затухания, добротность колебательной системы;
- записать уравнения закона гармонических колебаний и закона затухающих колебаний, объяснить, какие величины входят в эти уравнения.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: В результате выполнения работы курсанты должны научиться измерять смещение от положения равновесия колебательной системы, период и амплитуду механических колебаний; рассчитывать коэффициент и логарифмический декремент затухания колебаний; рассчитывать погрешности измерений в данной работе.

Оборудование: лабораторная установка – **пружинный маятник** (вертикальная пружина, груз фиксированной массы), линейка; лазерный указатель текущего положения груза; секундомер.

Краткие теоретические сведения

Колебаниями называются процессы, в той или иной степени периодически повторяющиеся с течением времени.

Различают **механические колебания** (колебательные движения), **электромагнитные колебания** (колебания электрических и магнитных величин в соответствующих системах).

Свободными колебаниями называют колебания, возникающие в колебательной системе под действием однократного внешнего воздействия (начального толчка или начального отклонения системы от состояния ее устойчивого равновесия).

Вынужденные колебания – это колебания, происходящие в колебательной системе, подверженной периодическому внешнему воздействию. В данной лабораторной работе изучаются свободные механические колебания пружинного маятника.

Закономерности свободных колебаний описываются с помощью двух моделей колебательных систем – модели идеального осциллятора и модели затухающего осциллятора.

Идеальный осциллятор – модель колебательной системы, которая пренебрегает потерями энергии в процессе колебаний и, следовательно, в которой колебания не затухают с течением времени. Колебания идеального осциллятора совершаются по **закону гармонических колебаний**

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1a)$$

или

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1б)$$

В этих формулах:

$x(t)$ – текущее значение отклонения **колеблющейся величины** от своего равновесного значения. Для пружинного маятника $x(t)$ – это текущее отклонение груза в процессе его колебаний от положения равновесия;

A – **амплитуда колебаний** – максимальное отклонение колеблющейся величины от своего равновесного значения. Размерность амплитуды совпадает с размерностью колеблющейся величины;

$(\omega_0 t + \varphi_0)$ – **фаза колебаний** – характеризует текущее состояние колебательной системы, φ_0 – **начальная фаза**. Фаза и начальная фаза в системе единиц СИ измеряются в радианах (рад);

ω_0 – **круговая (циклическая) частота** колебаний – характеризует быстроту совершения колебаний. В системе единиц СИ $[\omega_0] = 1/\text{с}$. Для каждой колебательной системы ω_0 имеет определенное значение, например, для пружинного маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

где k – коэффициент жесткости пружины, m – масса груза.

Кроме круговой частоты ω_0 , другими характеристиками быстроты колебаний являются их период и частота. **Периодом колебаний** T называется промежуток времени, за который совершается одно полное колебание. За один период колебаний фаза этих колебаний увеличивается на 2π , т.е. $(\omega_0(t + T) + \varphi_0) - (\omega_0 t + \varphi_0) = 2\pi$, откуда $T = 2\pi/\omega_0$. Для пружинного маятника, как следует из формулы (2),

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3)$$

Частотой колебаний ν называется количество колебаний, совершаемых за 1 с. Очевидно $\nu = 1/T = \omega_0/2\pi$. Размерность частоты $[\nu] = 1/\text{с} = \text{Гц}$ (герц). Например, частота колебаний переменного тока в бытовой электросети в Украине равна 50 Гц. Это значит, что за время, равное 1 с совершается 50 колебаний величины тока.

Величины A , ω_0 , φ_0 , T и ν в рамках модели идеального осциллятора не изменяются в процессе колебаний и называются **характеристиками гармонических колебаний**. График гармонических колебаний представлен на рис. 3.23.

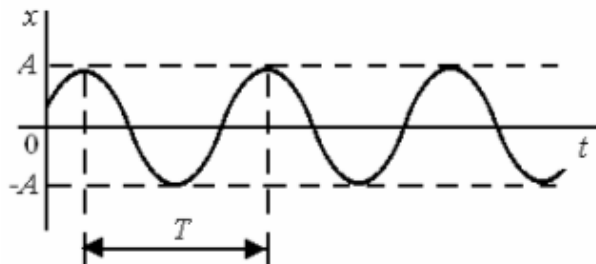


Рисунок 3.23 График гармонических колебаний

Затухающий осциллятор – модель колебательной системы, в которой учитываются потери энергии, происходящие из-за наличия сил трения в системе (механические колебания) или наличия электрического сопротивления (в электрических цепях, в которых осуществляются электромагнитные колебания). Закон затухающих колебаний имеет вид

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (4a)$$

или

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (4б)$$

В этих формулах:

A_0 – **начальная амплитуда** колебания (т.е. амплитуда в момент $t = 0$);

$e = 2,718281...$ – основание натуральных логарифмов;
 β – **коэффициент затухания** колебаний, в системе единиц СИ $[\beta] = 1/c$; ω – круговая частота затухающих колебаний. Как показывает расчет

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (5)$$

Это означает, что с увеличением коэффициента затухания быстрота совершения колебаний уменьшается, а **период**

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

вытекает из формулы (5), затухающие колебания могут существовать в колебательной системе только при $\omega_0 > \beta$.

Как следует из формул (4), **амплитуда затухающих колебаний** уменьшается со временем по закону

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}. \quad (6)$$

График затухающих колебаний представлен на рис. 3.24.

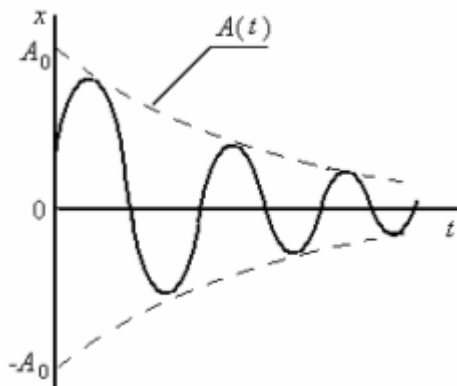


Рисунок 3.24 График затухающих колебаний

Кроме коэффициента затухания колебаний β к характеристикам затухания колебаний относится безразмерная величина – **логарифмический декремент** затухания λ , который определяется по формуле

$$\lambda = \beta T. \quad (7)$$

Для выяснения физического смысла логарифмического декремента затухания рассмотрим амплитуды двух последовательных колебаний n -го ($n + 1$ -го). Как следует из формулы (6) $A_n(t) = A_0 e^{-\beta t}$, $A_{n+1}(t + T) = A_0 e^{-\beta(t+T)}$ (рис.3.25). Их отношение равно

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta T} = e^{\lambda}, \text{ откуда } \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ln(e^{\lambda}). \text{ Учитывая}$$

определение понятия натурального логарифма, окончательно получим:

$$\lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}, \quad (8)$$

т.е. логарифмический декремент затухания колебаний равен натуральному логарифму отношения двух последовательных амплитуд колебаний. Это означает, что при $\lambda \ll 1$ колебания

затухают медленно, а при $\lambda \sim 1$ затухание происходит очень быстро.

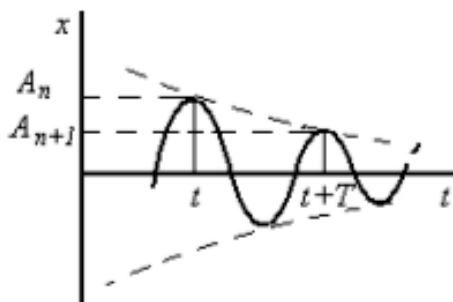


Рисунок 3.25 К выводу формулы (8)

Для колебательных контуров в радиотехнических системах в качестве характеристики затухания используют **добротность** $Q = \pi/\lambda$, при этом медленному затуханию соответствует $Q \gg 1$, быстрому $Q \sim 1$.

Ход работы

1. Измеряют коэффициент упругости пружины. Для этого груз известной массы m (значение массы выбито не грузе) подвешивают к пружине и определяют ее удлинение x_0 . Коэффициент упругости пружины определит по формуле

$$k = \frac{mg}{x_0}.$$

Абсолютную погрешность измерения величины Δk оценивают из соотношения

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta x_0}{x_0},$$

где Δx_0 – абсолютная погрешность величины x_0 .

Результат измерения значения коэффициента упругости пружины записывают в виде: $k = k_0 \pm \Delta k$.

2. Измеряют период колебаний груза на пружине T . Для этого возбуждают колебания и измеряют время t , за которое совершаются $n = 10$ колебаний. Период колебаний определяют по формуле $T = t/n$. Опыт повторяют 5 раз, рассчитывают среднее

значение периода $T_{\text{ср}}$, определяют абсолютную погрешность каждого отдельного измерения ΔT и абсолютную погрешность и ее среднее значение $\Delta T_{\text{ср}}$. Результаты заносят в таблицу 3.17.

Таблица 3.17

№ опыта (i)	1	2	3	4	5	$T_{\text{ср}}$	$\Delta T_{\text{ср}}$
t_i							
$T_i = t_i/n$							
$\Delta T_i = T_i - T_{\text{ср}} $							

3. Измеряют коэффициент затухания колебаний груза. Для этого возбуждают колебания и, пропустив 2-3 колебания, определяют амплитуды последующих колебаний. Амплитуды измеряют по одну сторону от положения равновесия через каждые 5 колебаний, количество измеренных амплитуд должно быть не менее пяти. Первая измеренная амплитуда обозначается A_0 , остальные A_1, A_2 , и т. д. Из формулы (6), с учетом того, что $t = nT$ ($n = 1, 2, 3 \dots$ – номер амплитуды) для коэффициента затухания β имеем:

$$\beta = \frac{1}{nT} \ln \frac{A_0}{A_n}.$$

Используя полученные таким образом для разных n значения коэффициента затухания $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots$, рассчитывают среднее значение $\beta_{\text{ср}}$, абсолютные погрешности каждого отдельного измерения $\Delta \beta_1, \Delta \beta_2, \Delta \beta_3 \dots$ и среднее значение погрешность измерения $\Delta \beta_{\text{ср}}$. Результаты заносят в таблицу 3.18:

Таблица 3.18

	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	$\beta_{\text{ср}}$	$\Delta \beta_{\text{ср}}$
A_n (см)								
β_n (с-1)								
$\Delta \beta_n = \beta_n - \beta_{\text{ср}} $								

4. Используя формулу (7) и результаты п. 2 и п. 3, определяют значение λ_0 и абсолютную погрешность $\Delta\lambda$ логарифмического декремента затухания. Результат записывают в виде $\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$.

5. Оформляют отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. Записать уравнение гармонических колебаний. Какая модель колебательной системы описывается этим уравнением?

2. Дать определения амплитуды, частоты, фазы, круговой частоты и периода колебаний.

3. Записать уравнение затухающих колебаний. Какая модель колебательной системы описывается этим уравнением? При каком условии в колебательной системе существуют затухающие колебания?

4. Как изменяется со временем амплитуда затухающих колебаний?

5. Дать определение логарифмического декремента затухания колебаний. Каков физический смысл этой величины?

Лабораторная работа К-3 **Изучение стоячих волн и определение** **коэффициента Пуассона воздуха**

Для допуска к лабораторной работе курсанты должны уметь:

- записать уравнение бегущей волны;
- вывести уравнение стоячей волны;
- записать формулу для скорости звука в газе;
- объяснить метод измерения коэффициента Пуассона, используемый в данной работе, вывести рабочую формулу.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: в результате выполнения работы курсанты должны научиться: измерять скорость звука в воздухе методом стоячих волн; вычислять коэффициент Пуассона воздуха.

Оборудование: лабораторная установка, генератор звуковых частот (ГЗ), электронный осциллограф (ЭО).

Краткие теоретические сведения

Объектом исследования в данной работе являются продольные звуковые волны в воздухе, возбуждаемые внутри длинной полый металлической трубы с помощью источника (И) – колеблющейся мембраны (см. рис. 3.26), расположенного вблизи одного из концов трубы. Уравнение **бегущей волны**, возбуждаемой источником, и распространяющейся вдоль оси трубы x , имеет вид:

$$s_1(x, t) = a \cos(\omega t - kx). \quad (1)$$

В этом уравнении:

s_1 – **колеблющаяся величина**, т.е. величина, которая совершает колебания в процессе распространения волны, например, смещение частиц среды (воздуха) от своего положения равновесия, происходящее в процессе распространения волны;

a – **амплитуда волны**, ввиду небольшой длины трубы ее можно считать одинаковой для всех значений x ;

ω – **круговая частота волны**, равная круговой частоте колебаний источника волны;

k – **волновое число**, $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$, где v – **фазовая скорость волны**, λ – **длина волны**. Начальную фазу волны в формуле (1) для простоты будем полагать равной нулю.

Если на некотором расстоянии l от источника волны поместить плоскую пластину (О), отражающую звуковую волну, то в трубе, наряду с волной (1), распространяющейся в положительном направлении оси x , возникнет отраженная волна, распространяющаяся ей навстречу, т.е. в отрицательном направлении оси x . Уравнение отраженной волны имеет вид:

$$s_2(x,t) = a \cos(\omega t + kx), \quad (2)$$

В результате интерференции (т.е. сложения) этих двух волн в трубе образуются пространственные колебания, которые называются **стоячей волной**. Ее уравнение можно вывести, если сложить уравнения (1) и (2): $s_{ст}(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = a \cos(\omega t - kx) + a \cos(\omega t + kx)$. Используя свойства тригонометрических функций, для **уравнения стоячей волны** имеем:

$$s_{ст}(x,t) = 2a \cos(kx) \cdot \cos(\omega t). \quad (3)$$

Это уравнение показывает, что каждая точка в стоячей волне совершает гармоническое колебание с угловой частотой ω , причем амплитуда этих колебаний не зависит от времени, но зависит от координаты точки x по закону:

$$A(x) = |2a \cos(kx)|. \quad (4)$$

Точки, амплитуда колебаний которых равна нулю, называются **узлами** стоячей волны (точки У на рис. 3.26). Координаты узлов x_U определяются из условия $\cos(kx) = 0$, откуда

$$x_U = \frac{(2m+1)\pi}{2k}, \text{ где } m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

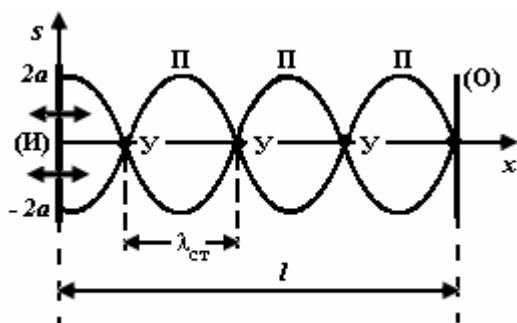


Рисунок 3.26 Стоячая волна

Точки, амплитуда колебаний которых максимальна и равна $2a$, называются **пучностями** стоячей волны, на рис. 3.26 они обозначены буквой П. Координаты пучностей x_{Π} определяются из условия $|\cos(kx)| = 1$, откуда

$$x_{\Pi} = \frac{m\pi}{k}, \text{ где } m = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

В реальной стоячей волне, возбуждаемой внутри круглой трубы, узлы и пучности представляют собой плоскости, перпендикулярные оси трубы x и пересекающие эту ось в точках, координаты которых определяются формулами (5) и (6).

Расстояние между соседними узлами (или между соседними пучностями) называется **длиной стоячей волны** $\lambda_{\text{ст}}$. Из формул (5), (6) можно получить

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{\pi}{k}. \quad (7)$$

Поскольку $k = 2\pi/\lambda$ (где λ - длина бегущей волны, испускаемой источником (И)), из соотношения (7) получим формулу связи длины стоячей и длины бегущей волн:

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Устойчивая стоячая звуковая волна образуется в трубе только в случае, когда источник волны (И) совпадает с пучностью, а отражатель (О) – с узлом стоячей волны, как показано на рис. 3.26. Это условие называется **условием резонанса** стоячей волны. При резонансе амплитуда волны становится максимальной, а звук –

особенно громким. Из рис. 1 видно, что условие резонанса выполняется когда рабочая длина трубы l равна целому числу длин стоячей волны плюс еще половина длины стоячей волны:

$$l = n + \frac{1}{2} \lambda_{\text{ст}}, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

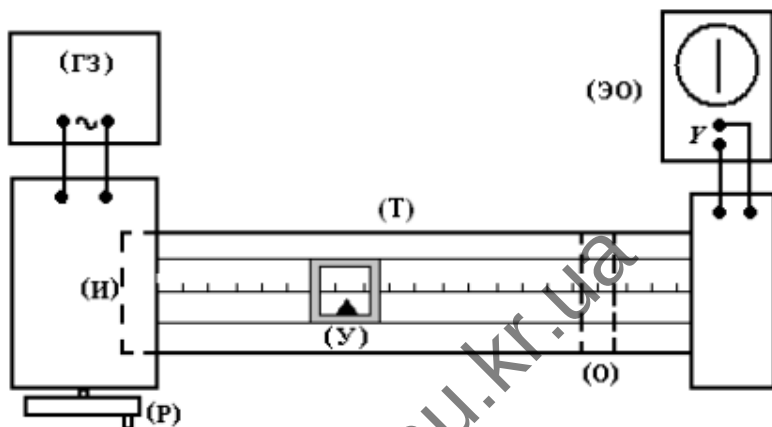


Рисунок 3.27 Схема лабораторной установки

Если изменять расстояние l , перемещая отражатель (О) вдоль трубы, то можно получить последовательность резонансов. При этом, как следует из формулы (9), изменение длины рабочей части трубы между двумя соседними резонансами равно $\Delta l = [(n + 1) + \frac{1}{2}] \lambda_{\text{ст}} - (n + \frac{1}{2}) \lambda_{\text{ст}} = \lambda_{\text{ст}}$. Тогда, с учетом соотношения (8), для длины бегущей волны, испускаемой источником (И), имеем:

$$\lambda = 2\Delta l. \quad (10)$$

Фазовая скорость бегущей звуковой волны в трубе определится по формуле: $v = \lambda \cdot f$ или, с учетом формулы (10)

$$v = 2\Delta l \cdot f, \quad (11)$$

где $f = \omega/2\pi$ – частота волны (задаётся генератором звуковых частот).

Скорость звука в воздухе определяется из соотношения:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (12)$$

где T – абсолютная температура воздуха, $R = 8,31$ Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная, γ – коэффициент Пуассона воздуха, $\mu = 0,029$ кг/моль – молярная масса воздуха. Приравняв правые части формул (11) и (12), получим **рабочую формулу** для определения коэффициента Пуассона воздуха:

$$\gamma = \frac{4f^2 \Delta l^2 \mu}{RT}. \quad (13)$$

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка схематически изображена на рис. 3.27.

Металлическая труба (Т) смонтирована на основании и снабжена сантиметровой шкалой, по которой с помощью указателя (У) отсчитывается расстояние между мембраной источника звуковых волн (И) и плоским поршнем, который является отражателем волны (О). Источник звука питается переменным напряжением заданной частоты от генератора звуковых частот (ГЗ). Поршень (О) и указатель (У) перемещаются вдоль трубы с помощью вращающейся ручки (Р).

В поршень вмонтирован пьезоэлектрический датчик давления, на клеммах которого возникает электрическое напряжение, пропорциональное давлению воздуха на поршень. Сигнал с датчика подается на клеммы «У» электронного осциллографа (ЭО), в результате на экране осциллографа возникает вертикальная полоса, высота которой пропорциональна амплитуде колебаний давления воздуха.

При перемещении поршня в трубе периодически выполняются условия резонанса (9). При каждом резонансе в трубе устанавливается стоячая волна, и на отражателе (О) образуется узел стоячей волны для колебаний величины смещения частиц среды от своих положений равновесия s . При этом давление на поршень достигает максимальной величины, и высота вертикальной полосы на экране осциллографа достигает максимума. Перемещая поршень, можно определить положения узлов и измерить расстояния Δl , на которое смещается поршень между соседними узлами.

Ход работы

1. Собирают установку согласно рис. 3.27.
2. Фиксируют по термометру температуру воздуха в лаборатории.
2. Включают генератор звуковых колебаний (ГЗ) и осциллограф (ЭО).
3. Устанавливают частоту колебаний ГЗ равной 1000 Гц. Перемещая поршень в направлении от мембраны динамика, провести отсчеты его положений, при которых возникает резонанс и образуются стоячие волны (не менее четырех точек). По результатам этих отсчетов определяют величину $\Delta l = \lambda_{ст}$ (не менее трех значений величины Δl). Найти ее среднее значение и абсолютную погрешность.
4. По формуле (11) рассчитывают скорость звука в воздухе v .
5. По формуле (13) рассчитывают коэффициент Пуассона воздуха γ .
6. П.п. 3-5 повторяют для частот 1500 Гц и 2000 Гц, каждый раз определяя величины v и γ .
6. Определяют среднее значение $v_{ср}$ и погрешность Δv .
7. Определяют среднее значение $\gamma_{ср}$ и погрешность $\Delta \gamma$.
8. Результаты оформляют в виде таблицы 3.19.

Таблица 3.19

$f(\text{Гц})$	$\Delta l_1(\text{м})$	$\Delta l_2(\text{м})$	$\Delta l_3(\text{м})$	$\Delta l_{ср}$	$v(\text{м/с})$	$v_{ср}$	Δv	γ	$\gamma_{ср}$	$\Delta \gamma$
1000										
1500										
2000										

Контрольные вопросы

1. Записать уравнение бегущей волны. Сформулировать определения ее характеристик: амплитуды, частоты, периода, волнового числа, длины волны.
2. Записать формулы связи характеристик бегущей волны.
3. Объяснить физический механизм образования стоячей волны в трубе, записать уравнение стоячей волны.
4. Что называется узлами и пучностями стоячей волны? Движутся они или покоятся?

5. От чего зависит скорость звука в газах. Оценить скорость звука в воздухе при обычных температурах.

6. Как зависит скорость звука в воздухе от высоты полета самолета?

7. Что называется коэффициентом Пуассона газа? Чему равно теоретическое значение коэффициента Пуассона для атмосферного воздуха?

8. Вывести рабочую формулу данной работы.

www.klana.u.kr.ua

Лабораторная работа О-2

Определение главного фокусного расстояния линзы методом Бесселя

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- строить изображения предмета создаваемого собирающей линзой;
- записать формулу тонкой линзы;
- дать определение понятия оптической силы линзы;
- записать формулу зависимости оптической силы линзы от ее параметров.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: в результате выполнения работы курсанты должны научиться: определять главное фокусное расстояние собирающей линзы методом Бесселя; рассчитать погрешности измерений в данной работе.

Оборудование: набор линз, экран; осветитель.

Краткие теоретические сведения

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представления о световых лучах, называется **геометрической оптикой**. **Световыми лучами** называют нормальные к волновым поверхностям линии, вдоль которых распространяется в пространстве поток световой энергии. Геометрическая оптика позволяет рассмотреть основные явления, связанные с прохождением световых лучей через оптические системы, и, поэтому, является основой теории объектива (прибора, используемого для формирования оптических изображений).

Линзы представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя **сферическими поверхностями** (одна из них может быть плоской, т. е. сферой бесконечно большого радиуса), преломляющими световые лучи, которые и формируют оптические изображения предметов. Материалом для линз служат стекло,

кварц, прозрачные кристаллы, пластмассы и т.п. По внешней форме (рис.3.28) линзы делятся на: 1) двояковыпуклые, 2) плосковыпуклые, 3) двояковогнутые, 4) плосковогнутые; 5) выпукло-вогнутые; 6) вогнуто-выпуклые.

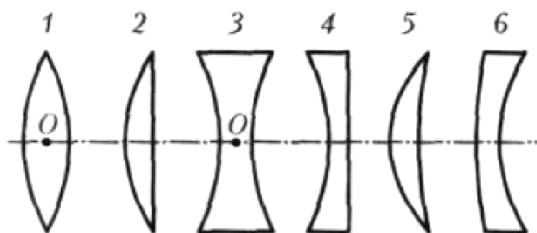


Рисунок 3.28

Линза называется **тонкой**, если ее толщина (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше радиусов кривизны этих поверхностей. Линза, у которой середина толще, чем края, называется **собирающей** (или **положительной**). На рис. 3.28 это линзы 1, 2, 5. Если края линзы толще ее середины, она называется **рассеивающей** (или **отрицательной**), на рис. 3.29 это линзы 3, 4, 6.

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется ее **главной оптической осью** (рис.3.29.). Для любой линзы существует точка (на рис. 3.29 это точка O), называемая **оптическим центром линзы**, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи, проходящие через линзу в этой точке, не преломляются.

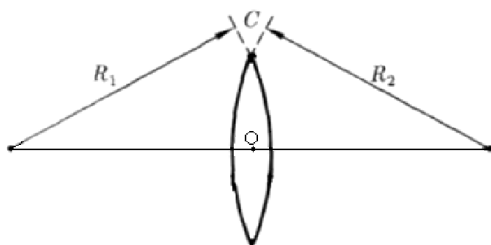


Рисунок 3.29

Основываясь на законе преломления света можно получить формулу, которая представляет собой **формулу тонкой линзы**. Она имеет вид:

$$(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (1)$$

где n – относительный показатель преломления материала линзы относительно среды в которой она находится, т. е. $n = n_{\text{пл}} / n_{\text{ср}}$;

R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы, причем радиус кривизны R считается положительным, если поверхность, которую он ограничивает, является выпуклой и отрицательным, если эта поверхность вогнутая;

a – расстояние от предмета до линзы; b – расстояние от линзы до изображения.

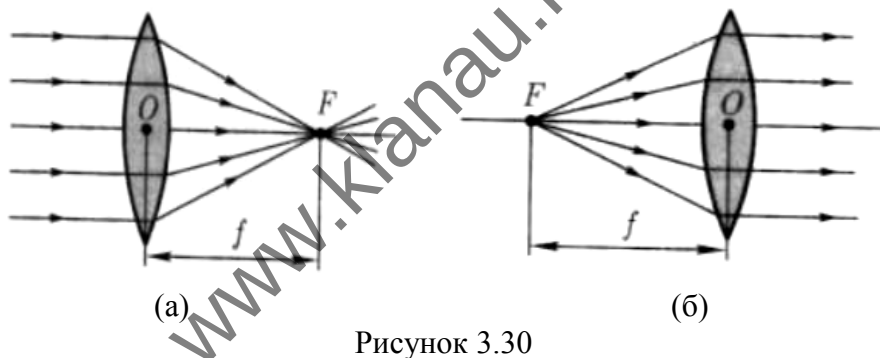


Рисунок 3.30

Если $a = \infty$, т.е. световые лучи падают на линзу параллельным пучком (рис.3.30,а), то из формулы (1) получим:

$$\frac{1}{b} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \quad (2)$$

Соответствующее этому случаю расстояние $b = OF = f$ называется **фокусным расстоянием линзы**. Из выражения (2) следует, что фокусное расстояние линзы определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}. \quad (3)$$

Таким образом, фокусное расстояние линзы зависит от ее относительного показателя преломления и радиусов кривизны ее поверхностей.

Если в формуле (1) положить $b = \infty$, то это будет означать, что изображение находится в бесконечности и, следовательно, лучи выходят из линзы параллельным пучком (рис.3.30,б). В этом случае из формул (1) и(3) следует, что $a = FO = f$. Таким образом, фокусные расстояния линзы, окруженной с обеих сторон одинаковой средой, равны.

Точки F , лежащие по обе стороны линзы на расстояниях, равных фокусному, называются **фокусами** линзы. **Фокус** – это точка, в которой после преломления в линзе собираются лучи, падающие на эту линзу параллельно ее главной оптической оси.

Величина $D = \frac{1}{f}$ называется **оптической силой** линзы. Она измеряется в диоптриях (дптр). **Диоптрия** – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м: 1 дптр = 1/м. Оптическая сила линзы рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \quad (4)$$

Линзы, у которых $D > 0$ являются собирающими, а у которых $D < 0$ – рассеивающими. В отличие от собирающей, рассеивающая линза имеет мнимые фокусы. В мнимом фокусе сходятся воображаемые продолжения лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси (рис.3.31).

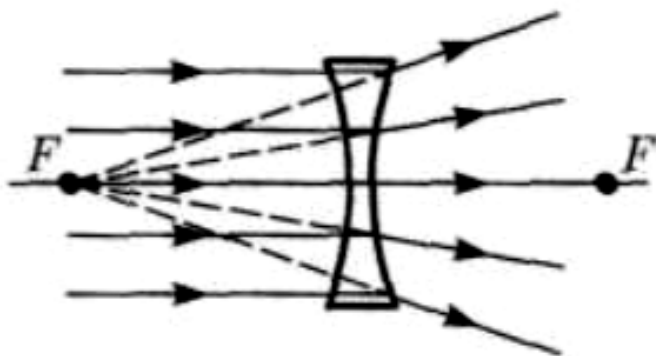


Рисунок 3.31

Учитывая (4), формулу линзы (1) можно записать в виде

$$\frac{1}{a} \pm \frac{1}{b} = \pm \frac{1}{f} \quad (5)$$

Для рассеивающей линзы расстояния величины f и b надо считать отрицательными.

Изображения предмета, создаваемое линзой, образуется как совокупность изображений каждой точки этого предмета. Построение **изображения точки** собирающей линзой осуществляется с помощью **двух** лучей, исходящих из этой точки. Обычно используют такие лучи (см. рис. 3.32,а, рис. 3.32,б, точка B):

1) луч, исходящий из этой точки и проходящий через оптический центр линзы. Этот луч не преломляется линзой и не изменяет своего направления;

2) луч, исходящий из этой точки и идущий параллельно главной оптической оси, после преломления в линзе этот луч проходит через ее фокус.

Изображение точки получается в месте пересечения этих лучей после прохождения линзы. Для примера приведены построения изображений в собирающей линзе (рис.5).

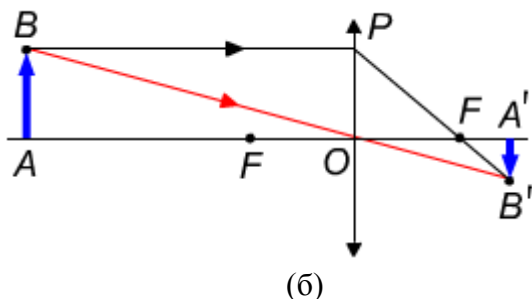
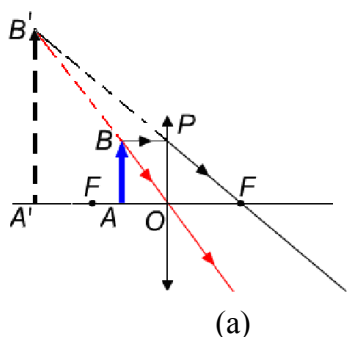


Рисунок 3.32

а) Построение изображения предмета AB , расположенного за фокусом линзы. В этом случае изображение $A'B'$ является **перевернутым** и **действительным** (это означает, что его можно реально получить на экране). Расстояния от предмета до линзы и от линзы до изображения (т. е. до экрана) связаны формулой (5), причем во всех случаях берутся знаки «+». На рис. 3.32,а изображен случай, когда линза дает уменьшенное изображение, т.е. **линейное уменьшение** линзы, определяемое по формуле

$$k = \frac{A'B'}{AB}, \quad (6)$$

удовлетворяет условию $k < 1$. Именно так работает объектив фотоаппарата, создавая уменьшенное изображение фотографируемого предмета на светочувствительной матрице или на фотопленке. Однако возможен также и случай, когда собирающая линза будет давать действительное увеличенное изображение ($k > 1$). Этот случай реализуется в различного рода проекторах, проецирующих изображение маленького кадра на большой экран со значительным увеличением.

б) Построение изображения предмета расположенного между фокусом и линзой. Действительного изображения в этом случае нет, но если расположить глаз наблюдателя справа от линзы и посмотреть на предмет AB через нее, то в точке пересечения продолжений лучей глаз (точнее, мозг) увидит точку B' – **мнимое**

изображение точки B предмета. То же самое справедливо и для всех остальных точек предмета. В результате в мозгу наблюдателя образуется мнимое изображение всего предмета $A'B'$. Это изображение будет **прямым** и **увеличенным**, и его невозможно получить на экране. Связь расстояний от предмета до линзы и от изображения до линзы выражается формулой (5), в которой перед величиной $1/b$ в ее левой части используется знак «-». Рис. 3.32,б соответствует действию увеличительного стекла (лупы).

Рассмотрим пример построения изображения в рассеивающей линзе (рис.3.33).

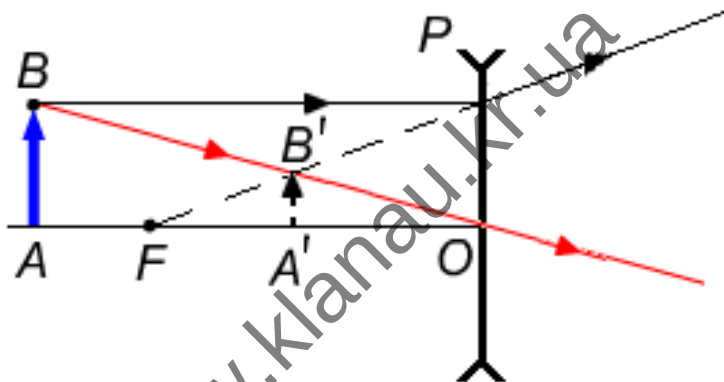


Рисунок 3.33 Построение изображения в рассеивающей линзе

Изображение, создаваемое рассеивающей линзой прямое, мнимое, уменьшенное. В формуле (5) для этого случая используются оба знака «-».

Комбинация собирающих и рассеивающих линз (объектив) применяются в оптических приборах, используемых для решения различных практических и научно-технических задач.

Описание установки

В лабораторной работе используется набор линз, источник света (лампочка или светодиод (рис.3.34)), экран.



а



б

Рисунок 3.34 а) источник света с комбинационным размещением светодиодов; б) набор линз из комплекта «Оптика-Классика»

Целью работы является определение фокусного расстояния f собирающей линзы и системы линз. В принципе фокусное расстояние линзы (или системы линз) можно было бы определить из формулы (5), измерив расстояние от предмета до оптического центра линзы a и расстояние от оптического центра линзы до изображения b . Однако величины a и b непосредственно нельзя определить точно в силу того, что в общем случае оптический центр O линзы не совпадает с центром симметрии и найти его положение трудно. Поэтому для точного измерения фокусного расстояния линзы используют **метод Бесселя**.

Из формулы (5) видно, что величины a и b можно менять местами, причем эта формула не изменит свой вид. Это можно осуществить на практике, передвигая линзу L вдоль линии, соединяющей предмет и экран. При этом на экране можно получить два изображения предмета AE (при двух положениях линзы): увеличенное A_1E_1 и уменьшенное A_2E_2 (рис. 3.35).

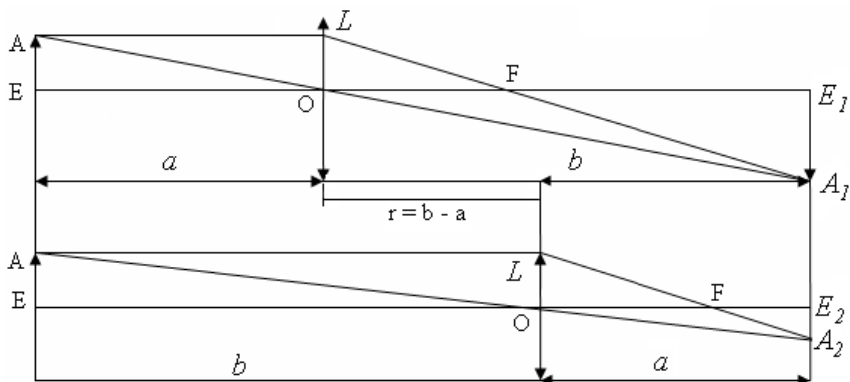


Рисунок 3.35

Обозначим величину, на которую сместился при этом оптический центр линзы O , через r ; величину r можно связать с перемещением любой точки линзы L , так как во время ее перемещения положение оптического центра внутри линзы не изменяется. Обозначим $B = b + a$ – расстояние от предмета до экрана (оно не изменяется в процессе работы), $r = b - a$ – расстояние, на которое передвинули линзу для получения второго изображения. Отсюда имеем:

$$a = \frac{B+r}{2}; \quad b = \frac{B-r}{2}.$$

Подставляя формулы для a и b в формулу (5) и решая полученное выражение относительно f , получим:

$$f = \frac{B^2 - r^2}{4B}. \quad (7)$$

Формула (7) – это формула метода Бесселя, которая является **рабочей формулой** данной работы и используется для определения фокусного расстояния f линзы.

Ход работы

1. Устанавливают экран по одну сторону стола, а по другую сторону – источник света.
2. Устанавливают линзу на подставке между экраном и источником света.

3. Включают источник света.

4. Перемещая линзу, добиваются резкого увеличенного изображения источника на экране и фиксируют по шкале положение указателя линзы (N'). Измерения повторяют пять раз, сдвигая с места линзу и вновь добиваясь резкого изображения на экране. Вычисляют среднее значение $N'_{\text{ср}}$.

5. Передвигают линзу, добиваются второго (уменьшенного) изображения источника. Фиксируют положение указателя линзы (N''). Измерения также повторяют пять раз и находят ($N''_{\text{ср}}$).

6. Вычисляют расстояние r , равное $r = N''_{\text{ср}} - N'_{\text{ср}}$.

7. Отсчитывают по шкале положение источника N_1 и положение экрана N_2 . Вычисляют расстояние $B = N_2 - N_1$.

8. По формуле (7) вычисляют фокусное расстояние линзы.

9. Вычисляют погрешности измерения фокусного расстояния. Результаты оформляют в виде табл. 3.20.

Таблица 3.20

№ п/п	N' , м	N'' , м	N_1 , м	N_2 , м	r , м	B , м	f , м	Δf , м

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятия геометрической оптики.

2. Дать определение понятия линзы и основных ее характеристик.

3. Какие виды линз существуют?

4. Построить изображение предмета в собирающей (рассеивающей) линзе.

5. Записать формулу линзы.

6. Дать определение оптической силы линзы. В каких единицах измеряется оптическая сила? От чего она зависит?

7. От чего зависит фокусное расстояние собирающей линзы?

8. Вывести рабочую формулу метода Бесселя. В чем преимущества метода Бесселя по сравнению с другими методами измерения фокусного расстояния линзы?

Лабораторная работа О-3

Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- сформулировать понятия угла падения (отражения, преломления) светового луча, абсолютного и относительного показателя преломления;
- сформулировать законы отражения и преломления света;
- вывести рабочую формулу для определения показателя преломления стекла.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций, учебники Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики».

Цель работы: изучить устройство, принцип действия, оптическую схему микроскопа, овладеть методом применения микроскопа для определения показателя преломления прозрачных тел (стекла).

Оборудование: микроскоп МБУ – 4, микрометр, набор стеклянных пластинок.

Краткие теоретические сведения

Если рассматривать какой-либо объект сквозь вещество (например, через стекло), показатель преломления которого больше показателя преломления воздуха, то этот объект кажется расположенным ближе к наблюдателю, чем в действительности. Это кажущееся приближение связано с преломлением света на границе вещество-воздух.

Величина этого смещения зависит от толщины слоя вещества (стеклянной пластинки) и его показателя преломления.

Пусть оптический микроскоп сфокусирован на некоторую точку O , расположенную на нижней грани стеклянной плоскопараллельной пластинки (рис.3.36).

Тогда произвольные лучи OB и OC после преломления на границе пойдут вдоль направления BE и CD . Наблюдателю же

будет казаться, что они выходят из точки O' , смещенной относительно точки O на величину b .

Установим связь между показателем преломления стекла n , толщиной пластинки d и мнимым смещением b' точки O .

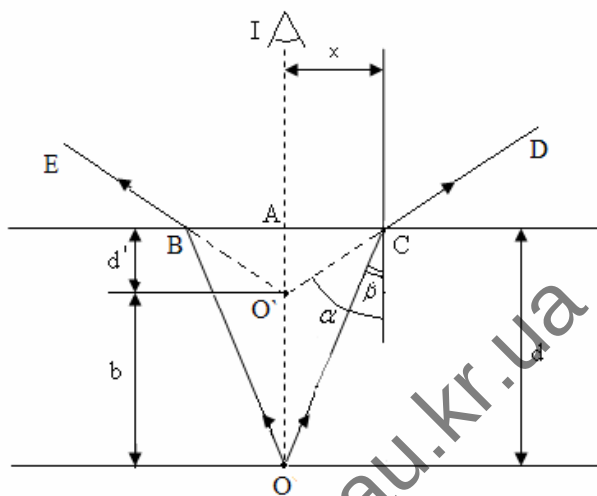


Рисунок 3.36

Из $\triangle AOC$ и $\triangle O'AC$ имеем:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x}{d} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{d - b} \quad (2)$$

Поделив (2) на (1), получим

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{d}{d - b} \quad (3)$$

При наблюдении вдоль вертикали, в глаз наблюдателя I попадут только те лучи, которые имеют очень малые углы α и β . При малых углах наблюдения:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} \approx \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (4)$$

Левые части формул (3) и (4) одинаковые. Приравнивая их правые части получим:

$$n = \frac{d}{d - b} \quad (5)$$

Величина $d - b$ представляет собой мнимую толщину пластинки. Она может быть определена микрометрическим винтом микроскопа при изменении его фокусировки от нижней до верхней грани пластинки.

Следовательно, для нахождения показателя преломления стекла, необходимо действительную толщину пластинки d (измеренную микрометром) разделить на мнимую толщину $d' = d - b$ (измеренную микрометрическим винтом микроскопа по ходу его тубуса).

Описание лабораторной установки

Для измерения мнимой толщины стеклянной пластинки в данной работе используется оптический микроскоп.

Микроскоп представляет собой сложный оптический прибор для наблюдения микрообъектов и получения их увеличенного изображения (рис.3.37). Он состоит из штатива 2, на котором закреплен предметный столик 8 со сквозным отверстием посередине и двумя упругими пластинками для крепления исследуемого предмета.

В верхней части штатива закреплен тубус 6, перемещение которого осуществляется винтом 7 и при точном фокусировании микровинтом 3.

Оптическая часть микроскопа состоит из объектива 7 и окуляра 5. **Объектив** представляет собой систему линз с малым фокусным расстоянием (несколько миллиметров). **Окуляр** состоит из двух линз с фокусным расстоянием, значительно большим фокусного расстояния объектива. Сферическое зеркало 9, способное вращаться относительно двух взаимоперпендикулярных осей, служит для освещения наблюдаемого предмета.

На рис.3.38 изображен ход лучей в микроскопе. Пучок лучей, отраженных от зеркала, падает на предмет $П$ (AB), помещенный на

столике микроскопа вблизи объектива на расстоянии, немного большем его фокуса, но меньшем двойного фокусного расстояния.



Рисунок 3.37

Лучи от предмета, попадая на объектив, дают увеличенное обратное действительное изображение $A'B'$. Это изображение рассматривается через окуляр, как в лупу, которая дает увеличенное мнимое обратное (по отношению к AB) изображение $A''B''$. Четкого изображения предмета добиваются перемещением тубуса винтами 3 и 4.

Увеличение микроскопа определяют отношением линейных размеров изображения к линейным размерам предмета:

$$K = \frac{A''B''}{AB} \quad (9)$$

Увеличение микроскопа зависит от характеристик оптической системы и определяется по формуле:

$$K = \frac{\Delta \cdot D}{F_{об} \cdot F_{ок}}, \quad (10)$$

где Δ – оптическая длина микроскопа (расстояние между объективом и окуляром), $D = 25$ см – расстояние наилучшего зрения, $F_{об}$ – фокусное расстояние объектива, $F_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра.

Для данного микроскопа произведение $\Delta \cdot D$ – величина постоянная, поэтому для значительного увеличения необходимо объектив и окуляр брать с малыми фокусными расстояниями. Современные оптические микроскопы дают увеличение порядка 2500.

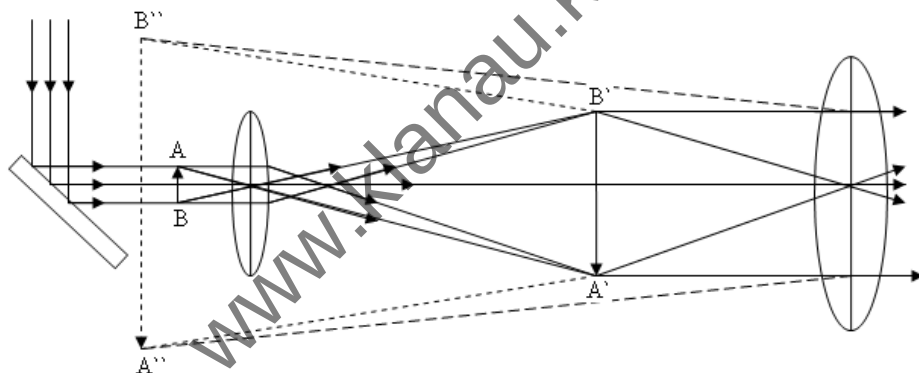


Рисунок 3.38

Ход работы

1. Записать цену деления диска микрометрического винта микроскопа в таблицу (для микроскопа, используемого в данной работе: 1 деление = 0,002 мм).
2. Записать шаг микрометрического винта микроскопа h в таблицу (для микроскопа, используемого в работе, $h = 50$ (делений микровинта) $\times 0,002$ мм (цена одного деления) = 0,1 мм).
3. На верхней и нижней сторонах пластинки нанести фломастером цветные точки разного цвета (одна под другой).

4. Измерить микрометром (штангенциркулем) толщину стеклянной пластинки.

5. Поместить стеклянную пластинку на предметный столик микроскопа под объектив так, чтобы цветные точки на стекле находились в поле зрения микроскопа.

6. Навести резкость на верхнюю метку и сделать отсчет N_1 по диску барабана микрометрического винта микроскопа.

7. Вращая микрометрический винт, навести резкость на нижнюю точку, отмечая при этом число полных оборотов винта m , отметить отсчет N_2 диска против указателя.

8. Для вычислений мнимой толщины пластинки воспользоваться равенством:

$$d' = d - b = [50m + (N_2 - N_1)] \cdot 0,002 \text{ (мм)} \quad (11)$$

9. По формуле (5) вычислить показатель преломления стекла n .

10. Измерения повторить пп. 4 - 9 не менее 3-х раз, каждый раз вычисляя значения n .

11. Усреднить полученные значения n и рассчитать абсолютную и относительную погрешности.

12. Результаты занести в таблицу 3.21. Оформить отчет о работе.

Таблица 3.21

№ изм.	Действ. толщ. пластинки, мм		Шаг винта, мм	Цена делен. винта (мм)	1-й отсчет N_1	Число полных оборотов m	2-й отсчет N_2	Мнимая толщина пластинки (мм)		Расчетное значение показателя преломления	
	d	Δd						d'	$\Delta d'$	n	Δn
1											
2											
3											
Сред. знач.											

Контрольные вопросы

1. Построить изображения предмета, создаваемое микроскопом.
2. Что называется увеличением микроскопа и от чего оно зависит?
3. Как формулируются основные законы геометрической оптики?
4. Вывести рабочую формулу данной работы.
5. Чем обусловлены погрешности измерения показателя преломления стекла в данной работе?
6. Объяснить кажущееся уменьшение глубины водоемов (при взгляде на них сверху) по сравнению с их действительной глубиной.

www.klapau.kr.ua

Лабораторная работа О-5

Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- дать определение дифракции света;
- сформулировать принцип Гюйгенса-Френеля;
- записать условия главных максимумов при дифракции света на дифракционной решетке;
- вывести рабочую формулу, используемую в данной работе для определения длины световой волны.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: научиться определять длину световой волны с помощью дифракционной решетки, вычислять погрешности измерений в данной работе.

Оборудование: источник света; дифракционная решетка; линейка с держателем дифракционной решетки; экран с вертикальной щелью и шкалой.

Краткие теоретические сведения

Дифракцией света называется совокупность явлений, обусловленных волновой природой света, которые наблюдаются при его распространении в средах с резко выраженными неоднородностями (например, вблизи границ непрозрачных или прозрачных тел, через маленькие отверстия в экранах и т.п.). Дифракция, в частности, предопределяет огибание световыми волнами препятствий и проникновение света в область геометрической тени. Наиболее четко дифракция наблюдается, если размеры препятствий или отверстий соизмеримы с длиной световой волны.

Явление дифракции лежит в основе действия одного из важнейших оптических приборов – **дифракционной решетки**, которая представляет собой систему, состоящую из большого

числа одинаковых щелей расположенных на равных расстояниях друг от друга. Простейшая дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которую с помощью точной делительной машины алмазным резцом наносятся параллельные штрихи (непрозрачные для света), между которыми остаются узкие прозрачные участки. Сумма расстояния между штрихами и ширины штриха называется **постоянной решетки** или **периодом решетки** d (рис.3.39). Дифракционные решетки могут быть плоскими или вогнутыми, а также отражающими или прозрачными.

Основное назначение дифракционных решеток – пространственное разложение светового излучения по длинам волн (т. е. по цветам), с целью получения **спектра** этого излучения. Это используется на практике для **спектрального анализа** излучения, исходящего от определенного источника с целью определения его химического состава.

Если на дифракционную решетку R (рис.3.39) направить пучок монохроматического света с длиной волны λ , то в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля, каждая прозрачная щель будет источником вторичных волн, распространяющихся во всех направлениях. Различное направление распространения световых волн на рис. 3.39, показаны в виде лучей.

Выделим лучи, которые идут от разных щелей решетки под одинаковым углом φ к оптической оси системы. Этот угол называется **углом дифракции**. Если за дифракционной решеткой установить собирающую линзу L , то она соберет параллельные лучи в одну точку A на экране $\mathcal{E}$, находящемся в фокальной плоскости линзы (т. е. в плоскости, находящейся от линзы на расстоянии, равном ее фокусному расстоянию F). При этом в точке A происходит интерференция волн от всех щелей, в результате которой происходит уменьшение или увеличение интенсивности результирующей интенсивности света в зависимости от различия хода соседних лучей. Это справедливо и для волн, исходящих от щелей решетки под другими углами дифракции. Таким образом, в каждой точке экрана $\mathcal{E}$ будет происходить интерференция волн, исходящих от щелей под соответствующим углом дифракции φ .

Увеличения интенсивности при интерференции волн от различных щелей наблюдается в случае, когда оптическая разность хода волн от соседних щелей δ равна целому числу длин волн:

$$\delta = d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (1)$$

где k – целое число, $k = 0, 1, 2, \dots$; d – постоянная решетки; φ – угол дифракции.

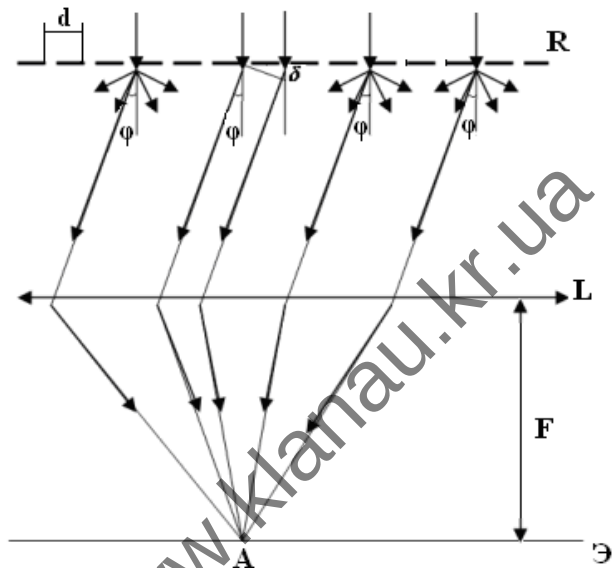


Рисунок 3.39

В соответствии с условием (1) запишем **условие главных максимумов для дифракции света на дифракционной решетке:**

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda. \quad (2)$$

Описание лабораторной установки

Для определения длины волны с помощью дифракционных решеток на одном из концов оптической скамьи (рис.3.40) установлен источник света – осветитель 1, экран с вертикальной щелью и шкалой 2, на другом конце оптической скамьи дифракционная решетка 3.

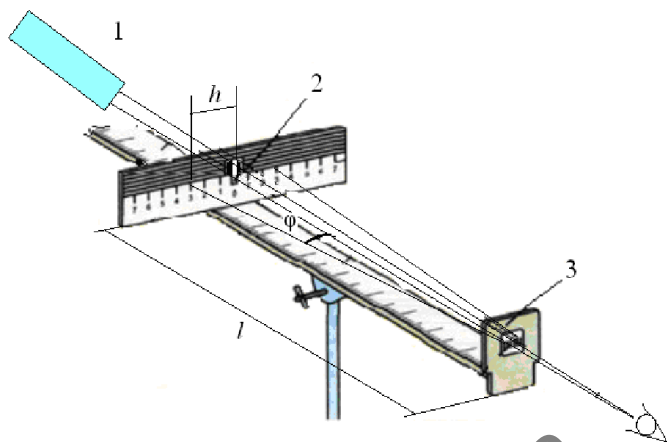


Рисунок 3.40 Общая схема установки для определения длины световой волны

Спектр наблюдается глазом на фоне шкалы. Роль линзы выполняет хрусталик глаза, который фокусирует параллельные пучки лучей от щелей дифракционной решетки на сетчатке глаза, как на экране (рис. 3.39).

Если l - расстояние от дифракционной решетки до шкалы, а h - расстояние от щели в линейке со шкалой до видимой спектральной линии данного цвета в спектре первого или второго порядка, то, учитывая, что $l \gg h$, имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi \approx \frac{h}{l} \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим **рабочую формулу** для определения длин волн спектральных линий:

$$\lambda = \frac{hd}{kl}. \quad (4)$$

Ход работы

1. Размещают оптическую скамью горизонтально, устанавливают осветитель. Размещают дифракционную решетку и линейку со щелью на оптической скамье как показано на рис. 3.40.

2. Включают источник света и незначительным поворотом дифракционной решетки вокруг вертикальной оси добиваются расположения боковых спектральных линий примерно на равных расстояниях от щели. Выбирают линии определенного цвета (по указанию преподавателя).

3. Измеряют по шкале линейки расстояние от щели до линий первого порядка ($k = 1$), а затем и до линий следующих порядков $k = 2, 3$ и т.д., обозначив их буквой h' по одну сторону от щели и h'' - по другую. Вычисляют среднее значение этих величин h . Результаты измерений занести в таблицу 3.22.

4. Измеряют расстояние l от линейки со щелью до решетки.

5. Опыты пп. 4-5 повторяют еще 2 раза при другом значении l .

6. Повторяют пп. 1-5 с другой дифракционной решеткой.

7. Рассчитывают длины волн по формуле (4).

8. Результаты измерений заносят в таблицу 3.22.

Таблица 3.22

Источник света	d , мм-1	h в спектре 1-го порядка, мм			h в спектре 2-го порядка, мм			h в спектре 3-го порядка, мм			λ , нм
		h'	h''	h	h'	h''	h	h'	h''	h	
(Лазер, лампочка)											
								$\lambda_{\text{ср}}$			
								$\Delta\lambda$			

9. Оформляют отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется дифракцией света?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.

3. Какой свет называется монохроматическим? Является ли монохроматическим солнечный свет?
4. Дать определение дифракционной решетки. Что является основной характеристикой решетки?
5. Записать условие максимумов при дифракции света на дифракционной решетке.
6. Что называется углом дифракции?
7. Вывести рабочую формулу данной работы.
8. Каково практическое назначение дифракционной решетки.
9. Объясните, почему дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр.

www.klapau.kr.ua

Лабораторная работа О-6

Определение концентрации сахарных растворов с помощью поляриметра

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- объяснить, в чем заключается различие между естественным и поляризованным светом ;
- записать формулы закона Малюса и закона Био;
- объяснить физический механизм работы поляриметра.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: научиться методу определения концентрации сахарных растворов с помощью поляриметра; исследовать зависимость угла поворота плоскости поляризации от концентрации растворов; вычислять погрешности измерений в данной работе.

Оборудование: поляриметр с кюветой; сахарные растворы различных концентраций; источник света; пипетка.

Краткие теоретические сведения

Согласно электромагнитной теории свет рассматривается, как электромагнитная волна, в которой векторы напряженности электрического поля $\vec{E}$ и магнитного поля $\vec{H}$ перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны. Таким образом, световая волна является волной **поперечной**, благодаря чему при исследовании световых волн в ряде случаев необходимо учитывать направление колебаний этих векторов.

Из векторов электрического и магнитного полей, фотохимическим действием (т.е. воздействием на наш глаз и на фотоматериалы) обладает вектор $\vec{E}$, который в оптике называется **световым вектором**. Поэтому за направление поляризации световой волны принимают направление колебаний вектора $\vec{E}$.

Если колебания вектора $\vec{E}$ совершаются только в одной плоскости, такой луч называется полностью поляризованным или **плоскополяризованным**.

Естественный свет, т.е. свет, излучаемый обычными нелазерными источниками (например, нагретыми телами), как правило, неполяризован. Это означает, что в естественном свете направление колебаний светового вектора $\vec{E}$ изменяется хаотически в процессе распространения волны. При этом вектор $\vec{E}$ в любой момент времени остается перпендикулярным направлению распространения света.

Поляризаторами называются оптические устройства (как правило, прозрачные монокристаллы) выделяющие из беспорядочно ориентированных направлений колебаний вектора $\vec{E}$ колебания в одной определенной плоскости, называемой **плоскостью поляризации**. В качестве поляризатора используют, например, кристаллы турмалина, кварца, исландского шпата и др.

Если плоско-поляризованную волну пропустить через второй поляризатор, то интенсивность прошедшего света будет зависеть от угла между направлениями поляризации первого и второго поляризатора. Если этот угол равен нулю, то луч пройдет второй поляризатор (называемый также **анализатором**), не изменив своей интенсивности, если же угол равен 90°, то интенсивность луча, прошедшего через анализатор, будет равна нулю. В общем случае справедлив закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \beta, \quad (1)$$

где I – интенсивность после выхода из анализатора; I_0 – интенсивность на входе в анализатор; β – угол между направлениями поляризации поляризатора и анализатора.

Некоторые вещества, называемые **оптически активными**, при прохождении через них плоско-поляризованной световой волны могут поворачивать плоскость поляризации относительно оси светового пучка. К таким веществам относятся сахарные растворы, кварц и др. На свойстве оптической активности сахарного раствора

основана настоящая работа. Для активных растворов справедлив закон Био: *угол поворота φ плоскости поляризации прямо пропорционален толщине слоя раствора l и концентрации c активного вещества*

$$\varphi = \alpha \cdot l \cdot c \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности α характеризует оптическую активность вещества и называется **постоянной вращения**.

Зная значение α для данной длины волны и данного растворителя, можно использовать закон Био для определения концентрации растворов.

Концентрацией раствора называется отношение массы m растворенного вещества к массе M раствора (т.е. растворителя и растворенного вещества вместе):

$$C = \frac{m}{M} \quad (3)$$

Обычно концентрацию выражают в процентах:

$$C = \frac{m}{M} 100\% \quad (4)$$

Так как угол поворота φ принято выражать в градусах, толщину слоя раствора l – в дециметрах, то постоянная вращения α получается выраженной в $\frac{\text{град}}{\text{дц} \cdot \text{проц}}$.

Описание установки

Схема устройства поляриметра представлена на рис.3.41. Неполяризованный свет от осветителя направляется с помощью осветительного зеркала 1 и, поляризуясь при прохождении через поляризатор 3, попадает в кювету 5 с исследуемым сахарным раствором, а затем через анализатор 6 и окуляр 7 в глаз наблюдателя 8.

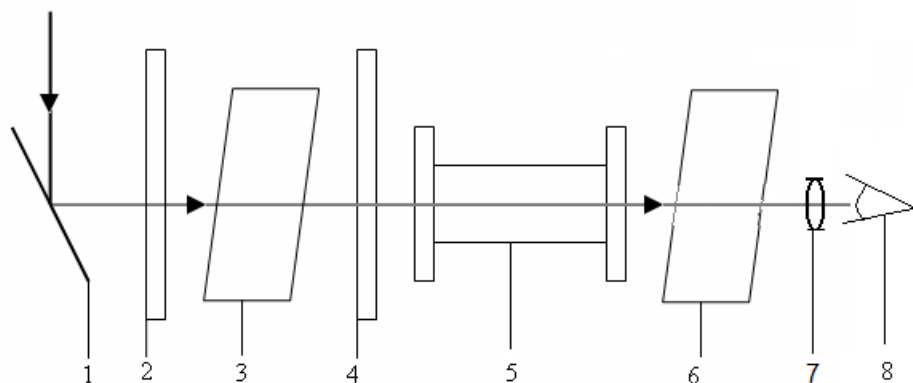


Рисунок 3.41 Схема устройства поляриметра

Перед анализатором установлен светофильтр 2, пропускающий узкий интервал волн, что необходимо, поскольку постоянная вращения α зависит от длины волны света. Кювета 5 представляет собой керамическую трубку с защитными стеклами и колпачками на ее торцах. Один из колпачков навинчивающийся, другой несъемный. Между поляризатором и кюветой помещена кварцевая пластинка 4, о назначении которой следует сказать отдельно.

В принципе, измерение угла поворота плоскости поляризации может производиться следующим образом. В отсутствие испытуемого раствора (кювета 5 вынута) поляризатор и анализатор устанавливают скрещенными, т.е. на темноту. Затем между ними помещается кювета с раствором, отчего поле зрения просветляется, т.к. раствор поворачивает плоскость поляризации луча на некоторый угол φ . Вращая анализатор, снова добиваются полного затемнения поля зрения, что, очевидно, произойдет при повороте анализатора на тот же угол φ . Отсчитав этот угол по шкале прибора, можно определить концентрацию по закону Био.

Однако, установка поляризатора и анализатора на максимальную темноту на глаз происходит неточно. Поэтому, для повышения чувствительности, а значит и точности прибора, пользуются особым приемом сравнения освещенностей отдельных частей поля зрения. Для этого и предназначена кварцевая пластинка 4. Она вырезана из кристалла кварца перпендикулярно своей плоскостью оптической оси

кристалла. Луч света проходит через пластинку в приборе вдоль ее оптической оси и испытывает при этом вращение плоскости поляризации. Пластинка располагается симметрично относительно центра поляроида. Таким образом, средняя часть пучка лучей, выходящих из поляроида, имеет после прохождения пластинки иное направление колебаний, чем остальная часть, и поле зрения оказывается разделенным на три области (рис.3.42, а) или разделенным на две области (рис.3.42,б).

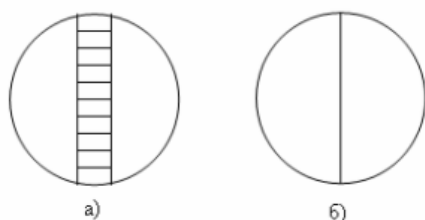


Рисунок 3.42

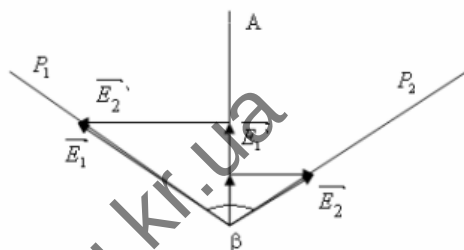


Рисунок 3.43

Когда плоскости пропускания поляризатора и анализатора установлены параллельно (на максимум), левая и правая части тройного поля зрения (рис.3.42) освещены ярко, а центральная часть кажется более темной.

При вращении анализатора две крайние части поля затемняются, а средняя просветляется, и в некотором положении все поле зрения становится освещенным однородно.

Это положение соответствует повороту анализатора на половину угла между направлениями колебаний в крайних и средней части пучка.

В самом деле, пусть P_1 (рис.3.43) есть плоскость колебаний в крайних частях пучка, т.е. плоскость колебаний, пропускаемых поляризатором, а P_2 – плоскость колебаний в средней части пучка (после прохождения кварцевой пластинки); $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ – соответствующие векторы амплитуд колебаний вектора электрического поля в этих пучках; A – плоскость пропускания анализатора. Очевидно, что анализатор пропускает в той и другой

частях пучка лишь составляющие амплитуд $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, которые равны между собой, когда плоскость A делит угол β пополам.

Благодаря сильной контрастности тройного поля зрения, чувствительность прибора становится очень высокой: нарушение однородности яркости зрения замечается глазом при повороте анализатора на десятые доли градуса. Помещение кюветы с раствором на пути луча приводит к повороту плоскости колебаний в крайних и средней частях пучка на один и тот же угол φ . Поворот анализатора на такой же угол возвращает однородную яркость всем частям поля зрения.

Отсчет угла φ производится по шкале окуляра (рис.3.44), снабженной нониусом, позволяющим отсчитывать десятые доли градуса. Для лучшего снятия отсчета шкала нониуса наблюдается через окуляр. Для лучшего наблюдения тройного поля зрения имеется система из объектива и окуляра, вращением которого добиваются резкого изображения поля.

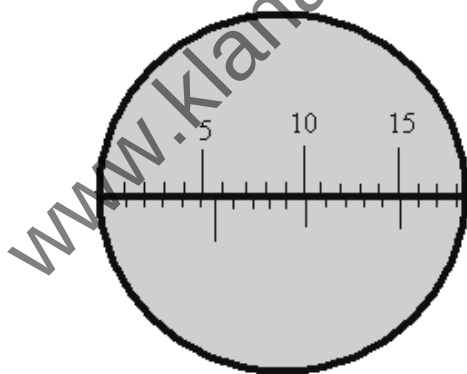


Рисунок 3.44

Ход работы

1. Вставляют пустую чистую кювету (кювету предварительно вымыть чистой водой) в открытую камеру прибора, с помощью осветительного зеркала направляют в прибор свет от осветителя и вращением окуляра добиваются резкости тройного поля и шкалы с нониусом.

2. Поворотом анализатора добиваются одинаковой освещенности во всех трех частях поля зрения (линии раздела исчезают) и производят отсчет по шкале нониуса. Отсчет должен быть близким к нулю (нулевая установка).

3. Вынимают кювету и, отвинтив колпачок, заполняют ее до краев исследуемым раствором с помощью пипетки, после чего аккуратно устанавливают защитное стеклышко и закручивают колпачок.

4. Кювету с раствором вставляют в прибор и заново устанавливают окуляр на резкое изображение линий раздела в тройном поле зрения. Затем поворотом анализатора восстанавливают однородную освещенность всего поля, нарушенную раствором, и снимают второй отсчет по шкале окуляра. Разность между вторым и первым (нулевым) отсчетом дает величину угла φ поворота плоскости поляризации раствором.

5. П.п. 1-4 повторяют для растворов других концентраций.

6. Рассчитывают постоянную вращения α , используя формулу (2) и несколько растворов заданных концентраций. Вычисляют среднее значение $\alpha_{\text{ср}}$ и погрешность измерения.

7. Строят график зависимости угла вращения плоскости поляризации φ от концентрации растворов.

8. Измеряют угол поворота плоскости поляризации нескольких растворов неизвестных концентраций. Определяют по графику концентрации этих растворов. Рассчитывают погрешности измерения концентраций.

9. Результаты работы отображают в таблице 3.23.

Таблица 3.23

Определение α							Определение C		
№ п/п	$C, \%$	φ	α	$\alpha_{\text{ср}}$	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha_{\text{ср}}$	φ	C	ΔC

10. Оформляют отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. Какой свет называется поляризованным? Как его получить?
2. Каково устройство и в чем заключается принцип работы поляриметра?
3. Как создается и для чего служит тройное поле зрения в поляриметре?
4. Почему при установке кюветы с раствором на пути луча нужно снова наводить окуляр на резкость?
5. Сформулировать законы Био, Малюса.

www.klanaui.kr.ua

Лабораторная работа О-7

Измерение длины световой волны с помощью интерферометра Юнга

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- воспроизвести определение интерференции света ;
- записать условия максимумов и минимумов при интерференции двух волн;
- объяснить принцип действия интерферометра Юнга.

Для подготовки к работе, кроме настоящих методических указаний, рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий, учебники: Т.И. Трофимова «Курс физики», И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3.

Цель работы: изучение явления интерференции света и принципа действия интерферометра Юнга; измерения длин волн синего и красного света.

Оборудование: интерферометр Юнга.

Краткие теоретические сведения

Интерференцией света называется явление наложения двух или нескольких когерентных световых волн, в результате которого происходит их взаимное усиление или ослабление, приводящее к перераспределению интенсивности света в пространстве.

Волны называются **когерентными**, если они имеют одинаковую частоту и постоянную (т.е. не изменяющуюся со временем) разность фаз. Этому условию удовлетворяют **монохроматические волны** – волны одной строго определенной частоты. Однако, в реальности ни один источник света не испускает строго монохроматическую волну с постоянной начальной фазой. Поэтому волны, которые излучаются любыми независимыми источниками света (кроме лазеров), всегда будут некогерентными.

Для создания условий, необходимых для осуществления интерференции световых волн от реальных источников применяют метод разделения волны, излучаемой одним источником, на два различных пучка. Эти пучки будут когерентны между собой, так

как происходят от одного и того же источника. Пучки пускают по различным оптическим путям, после чего они накладываются друг на друга и интерферируют.

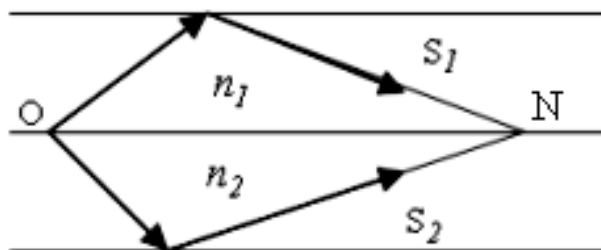


Рисунок 3.45

Пусть разделение на два когерентных пучка происходит в некоторой точке O (рис.3.45). До точки N , в которой наблюдается интерференционная картина, один пучок, т.е. волна, распространяется в среде с показателем преломления n_1 и проходит путь l_1 , второй – в среде с показателем преломления n_2 проходит путь l_2 . Если в точке O фаза колебаний равна ωt , то в точке наблюдения N первая волна возбуждит колебание

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{l_1}{v_1} \right), \quad \text{вторая волна} \quad - \quad \text{колебание}$$

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{l_2}{v_2} \right), \quad \text{где } v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2} \quad - \quad \text{соответственно фазовые}$$

скорости первой и второй волны. Разность фаз колебаний, возбуждаемых этими волнами в точке N , с учетом того, что

$$\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{cT} = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad \text{равна}$$

$$\delta = \omega \left(\frac{l_2}{v_2} - \frac{l_1}{v_1} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (l_2 n_2 - l_1 n_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (S_2 - S_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (7)$$

где λ_0 – длина волны в вакууме.

Произведение геометрической длины l пути световой длины в данной среде на абсолютный показатель n преломления этой среды называется **оптической длиной пути** волны S , а $\Delta = S_2 - S_1$ (разность оптических длин проходимых волнами путей) называется **оптической разностью хода волн** в точке наблюдения.

Если оптическая разность хода волн равна целому числу волн в вакууме (или четному числу длин полуволн)

$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}, \text{ где } m = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

то в этом случае из формулы (7) следует, что $\delta = \pm 2\pi m$, и колебания, возбуждаемые в точке N обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе и **усиливать** друг друга. Следовательно, формула (8) является условием **интерференционного максимума**.

Если оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволн

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \text{ где } m = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

то $\delta = \pm (2m + 1)\pi$ и колебания, возбуждаемые в точке N обеими волнами, будут происходить в противофазе и **ослаблять** друг друга. Следовательно, уравнение (9) является условием **интерференционного минимума**.

Описание лабораторной установки

Интерферометр Юнга представляет собой корпус с профилем, имеющим квадратное сечение (1), два тест-объекта (2), окуляр (3), источник света на основе светодиодов (4), источник питания, в котором используются пальчиковые батарейки (5). Внутри интерферометра вмонтированная входная щель постоянной ширины 0,1 мм и измерительная сетка-экран (рис.3.46). Оптическая схема интерферометра представлена на рис.2.

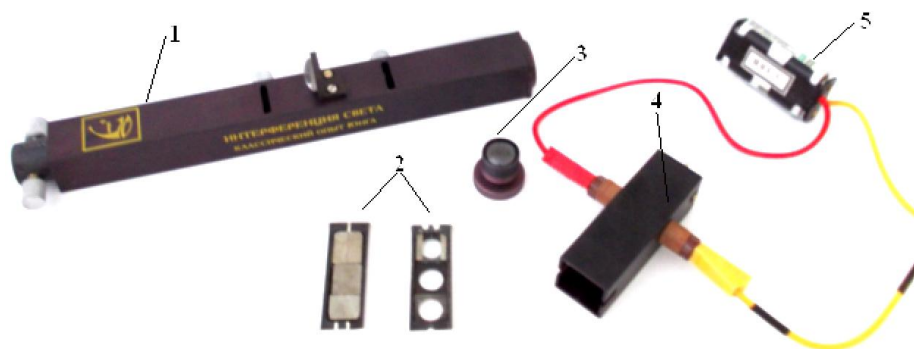


Рисунок 3.46 Интерферометр Юнга

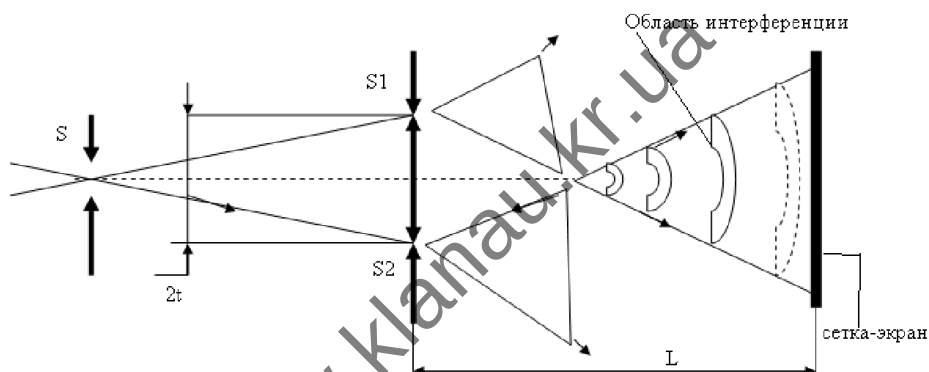


Рисунок 3.47 Оптическая схема классического опыта Юнга:

S – входная щель, $S1$ и $S2$ – двойная щель Юнга,

L – расстояние между двойной щелью и сеткой,

$2t$ – расстояние между щелями в двойной щели Юнга

Комбинированный тест-объект № 1, в виде одинарной и двойной щели, расширяет возможности интерферометра Юнга (рис.3.48,а). Становится доступным, кроме наблюдения явления интерференции на двойной щели Юнга, наблюдения дифракции на одиночной щели (аналог точечного отверстия). Дополнительный тест-объект № 2 (рис.3.48,б), установленный в одной из посадочных прорезов вблизи окуляра, позволяет наблюдать явление интерференции на бипризме Френеля и явление дифракции на тонком экране – «нити».

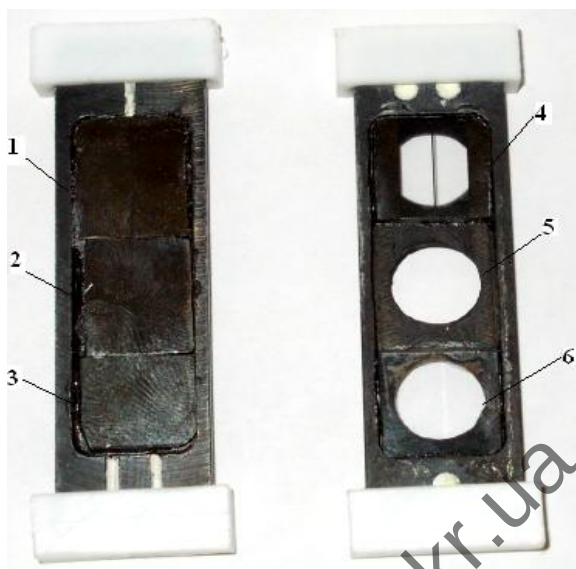


Рисунок 3.48 Набор тест-объектов:

а) тест-объект № 1 состоит из:

1 – широкой щели, 2 – узкой щели, 3 – щели Юнга (двойная);

б) тест-объект № 2 состоит из:

4 – бипризмы Френеля, 5 – окна, 6 – тонкого экрана („нить”).

Революционной идеей в опыте Юнга являлось применение первой входной щели S . При отсутствии таковой, как и при большой ее ширине, не обеспечивается пространственная когерентность световых пучков, освещающих двойную щель Юнга, что неминуемо ведет к отсутствию видимости интерференционной картины. При использовании лазерного излучения необходимость в первой щели отпадает, поскольку лазерный пучок является пространственно когерентным в своем сечении.

Ход работы

1. Устанавливают тест-объект № 2 в нейтральное положение «центр».

2. Позиционируют планку с тест-объектом № 1 в положение «2» (двойная щель).

3. Наводят окуляр на четкое изображение делений шкалы сетки. Закрепляют на переходной втулке интерферометра штатный осветитель, выполненный на 2-х светодиодах.

4. Поочередно включают красный и синий светодиоды и наблюдают интерференционную картину и, одновременно, штрихи шкалы сетки окуляра интерферометра. Предварительно следует навести резкость на четкое видение штрихов сетки.

Примечание. Для того, чтобы интерференционная картина была более яркой, допускаются наклоны осветителя относительно интерферометра (вправо-влево) в пределах люфты посадочной втулки.

5. По шкале сетки измеряют количество темных (светлых) полос N , приходящихся на соответствующее количество делений n сетки. Тогда расстояние между дифракционными минимумами (максимумами) составит:

$$d = \frac{en}{N} \quad (10)$$

Учитывая, что цена минимального деления измерительной сетки в поле зрения окуляра $e = 0,2$ мм, получим:

$$d = \frac{0,2n}{N} \text{ (мм)} \quad (11)$$

6. По методу, изложенному в п. 5 измеряют расстояние между максимумами интерференционных полос для излучения красного и синего светодиодов: $d_{\text{кр}}$ и $d_{\text{син}}$. В каждом случае измерения проводят не менее 3-х раз при различных значениях N и n , полученные результаты усредняют.

7. Подставляют полученные (усредненные) значения $d_{\text{кр}}$ и $d_{\text{син}}$ в формулу для определения длины волны света: $d \sin \varphi = k\lambda$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - порядок спектра, т. е. номер интерференционного максимума от центра интерференционной картины). Для первого порядка спектра $k = 1$, а угол φ , по которому виден максимум первого порядка, мал. Поэтому $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \frac{2t}{L}$.

При этих условиях получим $\lambda = d \frac{2t}{L}$, т. е., с учетом (11),

$$\lambda = \frac{0,2n}{N} \frac{2t}{L}, \quad (12)$$

где $2t$ – расстояние между щелями в двойной щели Юнга ($2t = 0,1 \text{ мм}$), а L – расстояние между двойной щелью Юнга и шкалой сетки ($L = 100 \text{ мм}$). С учетом этого длина волны рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{0,2n}{N} 0,001 \text{ (мм)} \quad (13)$$

8. Рассчитывают по формуле (13) длину волны для красного и синего светодиодов.

9. Рассчитывают погрешности и оформляют отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Каким образом получают когерентные волны?
4. Записать условия максимумов и минимумов для интерференции двух волн.
5. Что называется оптической длиной пути световой волны?
6. Что называется оптической разностью хода световых волн?
7. Расскажите о устройстве и принципе действия интерферометра Юнга.
8. Какие виды интерферометров Вы знаете?

Лабораторная работа А-1

Определение постоянной Стефана-Больцмана оптическим пирометром с исчезающей нитью

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- сформулировать определение понятий теплового излучения, основных характеристик излучающей поверхности;
- сформулировать законы теплового излучения;
- вывести рабочую формулу для определения σ в данной работе.

Для подготовки к работе, кроме настоящих указаний, рекомендуется использовать: конспекты лекций и практических занятий; учебники (И.В. Савельев «Курс общей физики», Т.И. Трофимова «Курс физики» и др.).

Цель работы: научиться экспериментально определять температуру нагретых тел пирометром; измерять величину постоянной σ ; вычислять погрешность измерений.

Оборудование: пирометр «ПРОМИНЬ», никелевая (или другая тугоплавкая) проволока, источник питания с амперметром и вольтметром, микрометр.

Краткие теоретические сведения

Излучение электромагнитных волн телом, обусловленное тепловым движением атомов и молекул этого тела, называется **тепловым (или температурным) излучением**. В состав теплового излучения входят волны различной длины, т.е. тепловое излучение характеризуется **сплошным спектром**, причем, на различных длинах волн излучается различная энергия. Длина волны соответствующая максимуму энергии излучения зависит от температуры излучающего тела. При высоких температурах максимальная энергия излучается на коротких волнах (видимые и ультрафиолетовые), при низких – преимущественно на длинных (красные и инфракрасные).

Тепловое излучение равновесно. Это значит, что если нагретое тело поместить в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой, то с течением времени, в результате непрерывного

обмена энергией между телом и его тепловым излучением, наступит термодинамическое равновесие. Из этого следует, что тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать.

К характеристикам излучающей поверхности относятся:

Испускательная **способность**, которая определяется по формуле:

$$E_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{изл.}}}{d\lambda}, \quad (1)$$

где $dW_{\text{изл.}}$ – энергия теплового излучения с единицы площади излучающей поверхности в единицу времени в бесконечно малом диапазоне длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. В системе единиц СИ $[E_{\lambda,T}] = \text{Вт/м}^2$.

Интегральная испускательная способность (энергетическая светимость) – это энергия излучаемая с единицы площади поверхности в единицу времени во всем интервале длин волн от 0 до ∞ при данной температуре. Эта величина определяется по формуле:

$$R_T = \int_0^{\infty} E_{T,\lambda} d\lambda, \quad (2)$$

$$[R_T] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Поглощательная способность – это отношение поглощаемой телом энергии электромагнитных волн к падающей энергии в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. Поглощательная способность тела зависит от температуры и определяется по формуле:

$$A_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{погл.}}}{dW_{\text{пад.}}}, \quad (3)$$

где $dW_{\text{погл.}}$ – поглощенная энергия; $dW_{\text{пад.}}$ – падающая энергия.

Кроме длины волны, испускательная и поглощательная способность тела зависят от его температуры, химического состава и состояния поверхности. При одинаковых условиях различные

тела имеют различные испускательные и поглощательные способности.

Тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него излучение, т.е. тело, для которого поглощательная способность при всех температурах и для всех длин волн равна единице, называется **моделью абсолютно черного тела**.

В 1859 г. Кирхгоф установил, что *отношение испускательной способности к поглощательной способности одинаково для всех тел в природе и равно испускательной способности абсолютно черного тела (закон Кирхгофа для теплового излучения)*:

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = f(\lambda, T) \quad (4)$$

Из уравнения (4) вытекает утверждение: *чем большую мощность тело поглощает на данном интервале длин волн при данной температуре, тем большую мощность оно будет излучать.*

Используя статистические методы и представление о квантовом характере теплового излучения, М.Планк получил для функции Кирхгофа выражение:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (5)$$

которое называется **формулой Планка** для теплового излучения. В формуле (5) λ – длина волны излучения; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Используя формулу Планка (5), можно получить законы теплового излучения:

Закон Стефана-Больцмана: интегральная испускательная способность абсолютно черного тела $R_{\text{ачт}}(T)$ пропорциональная четвертой степени абсолютной температуры:

$$R_{\text{ачт}}(T) = \int_0^{\infty} f_{\lambda, T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15c^2 h^3} = \sigma T^4, \quad (6)$$

где σ – коэффициент пропорциональности, который называется **постоянной Стефана-Больцмана**.

Если тело не является абсолютно черным, то его энергетическая светимость, определяется по формуле:

$$R(T) = \alpha \sigma T^4, \quad (7)$$

где коэффициент α называется **степенью черноты** (или **коэффициентом серости**) тела, $\alpha < 1$.

Закон Вина: произведение длины волны излучения абсолютно черного тела, для которой испускательная способность максимальна, на абсолютную температуру этого тела есть величина постоянная:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (8)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Целью данной работы является определение постоянной σ в законе Стефана-Больцмана. В данной работе излучающим телом является никелевая проволока.

Если излучение тела при температуре T происходит в среде, имеющей определенную температуру T_0 , то потеря теплоты вследствие излучения с единицы поверхности в единицу времени с учетом формулы (7) определяется выражением:

$$Q = R(T) - R_0(T) = \alpha \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (9)$$

откуда

$$\sigma = \frac{Q}{\alpha(T^4 - T_0^4)}. \quad (10)$$

Величина Q в состоянии равновесия равна электрической мощности $N = I \cdot U$, выделяемой на проволоке (I – сила тока в проволоке, U – напряжение на ней).

Тогда

$$Q = \frac{IU}{S}. \quad (11)$$

Подставляя значение Q из (11) и (10), получим

$$\sigma = \frac{IU}{\alpha S(T^4 - T_0^4)}. \quad (12)$$

Площадь проволоки $S = \pi l d$, где d – диаметр нити; l – ее длина. Поэтому

$$\sigma = \frac{IU}{\alpha \pi l d (T^4 - T_0^4)} \quad (13)$$

Эта формула является **рабочей формулой** данной работы. Измерив T , T_0 , I , U , d , l и зная, что для нихрома $\alpha = 0,4$, можно вычислить значение постоянной Стефана-Больцмана σ по формуле (13).

Описание установки

Пирометр визуальный ПРОМИНЬ является пирометром с исчезающей нитью и предназначен для измерения температуры поверхности различных объектов (рис.3.49).



Рисунок 3.49 Пирометр визуальный «Проминь»:

- 1 – объектив; 2 – переключатель диапазона;
3 – «+»; 4 – «-»; 5 – окуляр; 6 – гнездо питания

В пирометре использован принцип уравнивания яркости изображения объекта с яркостью нити пирометрической лампы. Равенства яркостей воспринимается наблюдателем как исчезновение нити лампы на фоне изображения объекта.

Конструктивно пирометр выполнен в виде малогабаритного переносного прибора.

На пирометре расположено 6 кнопок управления **«Вкл.»**, **«+»**, **«-»**, **«Зап.»**, **«Меню»**, **«x100»** и переключатель диапазонов.

Назначение кнопок **«Вкл.»** - кратковременное нажатие включает прибор, длительное нажатие отключает прибор; **«+»** и **«-»** – в основном режиме увеличивают (уменьшают) температуру с дискретностью в 1 °С, в режиме меню выбирают следующий (предыдущий) элемент меню, либо увеличивают (уменьшают) значение корректируемого параметра; **«Зап.»** - в основном меню записывает значение измеренной температуры в память. В режиме меню выбирает элемент меню и сохраняет его скорректированное значение. **«Меню»** - в основном режиме переходит в режим меню.

В режиме меню отменяет произведенные корректировки и возвращается на предыдущий уровень меню либо выходит в основной режим; **«x100»** - в основном режиме совместно с нажатыми **«+»** и **«-»** увеличивает (уменьшает) температуру с дискретностью в 100 °С. Удерживая пирометр в правой руке перемещением окуляра добиться резкой видимости нити в поле зрения. Пирометр следует визировать на объект измерения, который должен находиться в центральной части поля зрения против указателя лампы. Путем нажатия на **«+»** и **«-»** добиться равенства цветовой температуры нити лампы и объекта. При одиночном нажатии на **«+»** или **«-»** текущая температура изменяется на 1°С. Если еще включен переключатель **«x100»**, то температура будет изменяться с шагом 100°С. После 10 непрерывных увеличений (уменьшений) температуры на 1°С прибор выдаст одиночный звуковой сигнал и теперь будет увеличивать (уменьшать) температуру с шагом в 10°С (ускоренный набор). При установке равенства цветовой температуры нити лампы и объекта нажать **«Зап.»**. Температура и время измерения будут записаны в текущую ячейку памяти.

По окончании измерений выключить пирометр для сохранения заряда батареи аккумуляторов. Для этого нажать и удерживать кнопку «Вкл.» до отключения индикатора.

Ход работы

1. Собирают цепь питания проволоки по схеме (рис.3.50).

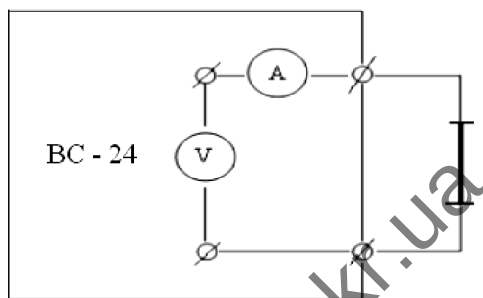


Рисунок 3.50 Схема установки для выполнения лабораторной работы

2. Включают питание BC-24 и регулятором установить силу тока в пределах от 6 А до 9 А. **Запрещается устанавливать силу тока более 9 А, так как проволока перегорит!**

3. При трех значениях силы тока в пределах $I = (6 \div 9) А$ измеряют пирометром температуру проволоки.

4. Записывают показания приборов при этой температуре, помня, что на измеряемом участке проволоки падение напряжения составляет 92% от показаний вольтметра.

5. Определяют длину и диаметр проволоки.

6. Измеряют комнатную температуру $t^{\circ}C$ и вычислить значение σ по формуле (13).

7. Рассчитывают абсолютную и относительную погрешности для определения σ .

8. Результаты измерений оформляют в табл. 3.24. Окончательный результат записывают в виде: $\sigma = \sigma_{cp} \pm \Delta \sigma_{cp}$.

9. Оформляют отчет о работе.

Таблица 3.24

№ п/п	$t^{\circ}\text{C}$, изм. пиром	$t^{\circ}\text{C}$, в лабор.	T , (K)	T_0 , (K)	I , (A)	U , (B)	σ	$\sigma_{\text{ср}}$	$\Delta \sigma$
1.									
2.									
3.									

Контрольные вопросы

1. Что называется тепловым излучением?
2. Дайте определение основных характеристик теплового излучения.
3. Сформулируйте законы теплового излучения.
4. Опишите порядок измерения температуры раскаленной проволоки оптическим пирометром с исчезающей нитью.
5. Выведите рабочую формулу данной работы.

лабораторная работа А-2

Изучение линейчатых спектров и определение постоянной Ридберга

Для допуска к данной работе курсанты должны уметь:

- сформулировать постулаты Бора;
- объяснить природу электромагнитного излучения атомов и молекул;
- вывести формулу для длин волн спектральных серий и записать ее для излучения атомов водорода в диапазоне видимого света.

Для подготовки к работе, кроме настоящих указаний, рекомендуется использовать: конспекты лекций и практических занятий; учебники: (И.В. Савельев «Курс общей физики», Т.И. Трофимова «Курс физики»).

Цель работы: экспериментально определять длину линий излучения; вычислить постоянную Ридберга и ее погрешность в данной лабораторной работе.

Оборудование: спектроскоп, газоразрядные трубки газов (гелия He , водорода H и др.), источник питания трубок.

Краткие теоретические сведения

Состав электромагнитного излучения тела называется его **спектром испускания**. Спектры испускания делятся на три типа: сплошные, полосатые и линейчатые. **Сплошные спектры** испускаются при нагревании твердых и жидких тел. **Полосатые спектры** возникают при излучении света возбужденными молекулами газов. **Линейчатые спектры** образуются в случае, если источником излучения являются атомы химических элементов, находящихся в газообразном состоянии.

Каждый химический элемент имеет типичный для него линейчатый спектр, т.е. определенный набор длин волн. Измерения длин волн спектральных линий показали, что эти длины волн соответствуют некоторым закономерностям, которые вначале были установлены эмпирически. Их теоретический расчет должен базироваться на уравнениях квантовой механики. Но для начального знакомства с этими проблемами в данной работе мы

ограничимся рассмотрением модели **атома водорода**, созданной датским физиком Н.Бором. Согласно этой модели, вокруг атомного ядра по орбитам, которые в первом приближении можно считать круговыми, вращаются электроны. Число электронов равно числу протонов в ядре и равно порядковому номеру элементов в таблице Менделеева. Атом водорода содержит **один электрон**. Теория Бора атома водорода основана на таких положениях (постулатах):

1. Электрон в атоме водорода может вращаться вокруг ядра только по орбитам с определенными радиусами, которые называются **стационарными орбитами**. Стационарными будут только те орбиты, для которых момент импульса электрона равен целому кратному величины $\frac{h}{2\pi}$, т.е.

$$mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (1)$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; v_n – линейная скорость электрона на n -ой орбите; r_n – радиус n -ой орбиты; $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число, указывающее номер стационарной орбиты; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $mv_n r_n$ – момент импульса электрона (момент количества движения) на n -ой орбите.

Таким образом, в атоме водорода для одного электрона возможно много различных стационарных орбит. **Находясь на стационарной орбите, электрон не излучает и не поглощает энергию.**

2. Атом излучает или поглощает энергию в виде кванта электромагнитного излучения (фотона) только при **переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую**, в соответствии с формулой:

$$h\nu = E_1 - E_2, \quad (2)$$

где $h\nu$ – энергия кванта (ν – частота излучения), E_1 – энергия электрона на начальной орбите, E_2 – энергия электрона на конечной орбите. При $E_1 > E_2$ происходит **излучение** атомом фотона с частотой

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}, \quad (3)$$

при $E_1 < E_2$ происходит **поглощение** фотона атомом.

Энергию электронов на различных стационарных орбитах определяется по формуле: $E = T + \Pi$, где $T = \frac{mv^2}{2}$ – кинетическая

энергия; $\Pi = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ – потенциальная энергия взаимодействия

электрона с ядром, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный электрический заряд, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная системы единиц СИ.

Точная теория, развитая Н.Бором, для энергии электрона на стационарной орбите дает формулу

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\epsilon_0 n^2} \quad (4)$$

Тогда, учитывая (3), частоту кванта, испускаемого при переходе электрона с орбиты с номером k на орбиту с номером i , можно определить следующим образом:

$$\nu_{ki} = \frac{E_k - E_i}{h} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (5)$$

Величину $R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$, (где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в

вакууме) называют **постоянной Ридберга**. С помощью R формулу (5) можно переписать в виде:

$$\nu_{ki} = Rc \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (6)$$

По формуле (6) можно рассчитывать также и энергию, необходимую для возбуждения атома, т.е. для перевода электрона

в атом на более удаленную от ядра орбиту. Наибольшая энергия потребуется для удаления электрона с первой орбиты в бесконечность (для ионизации атома). Для этого в формуле (11) значение $i = 1$, а $k = \infty$. Тогда энергия ионизации рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{ион}} = hRc \approx 13,6 \text{ эВ}, \quad (7)$$

где 1 эВ (электронвольт) = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Учитывая связь между частотой и длиной волны $\nu_{ki} = \frac{c}{\lambda_{ki}}$,

выражение (6) можно переписать в виде:

$$\frac{1}{\lambda_{ki}} = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (8)$$

В атоме водорода спектральные линии объединяют в серии по номерам уровней энергии, входящих в формулу (8). При переходах электрона с различных стационарных орбит на первую ($n_i = 1, n_k = 2, 3, \dots$) излучаются частоты линий, образующие **серию Лаймана**, расположенную в ультрафиолетовой области. При $n_i = 2, n_k = 3, 4, 5, 6, \dots$, что соответствует переходам электрона на вторую орбиту, атом испускает частоты видимого (первые четыре линии) и ультрафиолетового излучения (последующие линии), объединенные в **серию Бальмера**. При переходах электрона с более удаленных на третью, четвертую и пятую орбиты образуются серии Пашена, Бреккета и Пфунда., расположенные в инфракрасной области.

Для серии Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda_{ki}} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{k^2} \right), k = 3, 4, 5, 6, \quad (9)$$

Наиболее яркими являются: красная линия ($H\alpha$, для нее $k = 3$); голубая ($H\beta$, для нее $k = 4$); синяя ($H\gamma$, для нее $k = 5$); фиолетовая ($H\delta$, для нее $k = 6$). Соответствующие им длины волн обозначаются: $\lambda\alpha, \lambda\beta, \lambda\gamma, \lambda\delta$.

Описание установки

Для получения спектров в данной работе используются газоразрядные трубки с исследуемыми газами, в которых при протекании тока в газе возникает электромагнитное излучение.

Исследование спектров веществ производится с помощью спектроскопов. **Спектроскопом** называется прибор, который служит для пространственного разделения излучения по длинам волн, причем наблюдение полученного спектра в целом или отдельных спектральных линий производится визуально, фотографируется или регистрируется приборами.

Работа призмного спектроскопа основана на явлении **дисперсии** – зависимости показателя преломления света от длины волны. Оптическая схема простейшего спектроскопа показана на рис.3.51.

Основной частью спектроскопа является стеклянная призма P , разлагающая в спектр падающий на нее после коллиматора параллельный пучок монохроматического света. Коллиматорная труба, состоит из узкой щели S_1 , которая располагается в фокальной плоскости линзы L_1 , что позволяет сформировать параллельный пучок света, падающий на призму.

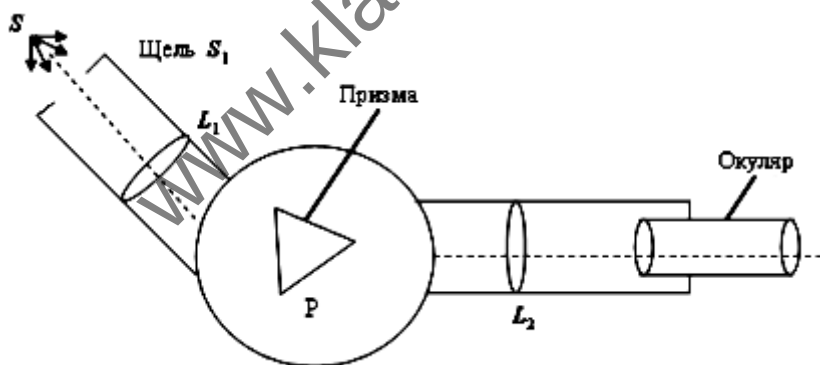


Рисунок 3.51 Схема спектроскопа

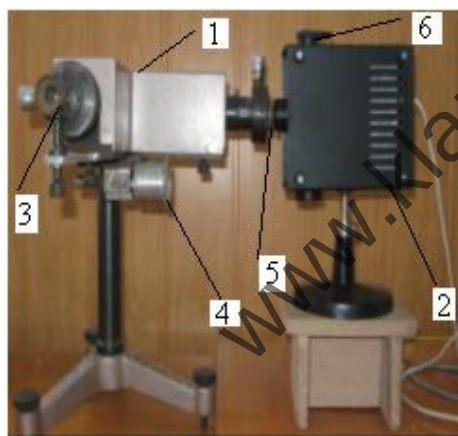
Поскольку лучи с разной длиной волны отклоняются призмой на разные углы, из призмы выходят параллельные пучки различной длины волны (т.е. пучки света различных цветов). С помощью линзы L_2 эти пучки собираются в различных точках фокальной плоскости линзы L_2 , где устанавливается окуляр для визуального наблюдения.

При вращении призмы P с помощью барабана спектр будет перемещаться относительно окуляра и стрелка, находящаяся в поле зрения окуляра, будет указывать на ту или иную линию, имеющую определенную цвет, соответствующий данной длине волны. График, дающий зависимость длины световой волны λ , от положения барабана называется **градуировочной кривой**.

Для построения градуировочной кривой необходим какой-либо известный спектр. Совмещая поочередно линии этого спектра со стрелкой в поле зрения окуляра и фиксируя при этих длинах волн положение барабана по делениям, нанесенным на нем, можно получить градуировочную кривую спектро스코па. В настоящей работе в качестве эталонного газа используется гелий (He).

Ход работы

1. Собирают схему лабораторной установки (рис.3.52).



а)



б)

Рисунок 3.52

а) Приборы для выполнения лабораторной работы:

- 1 – спектроскоп, 2 – источник питания трубок, 3 – окуляр,
4 – барабан, 5 – щель, 6 – отверстие для вставки газоразрядных трубок;
б) газоразрядные трубки: гелий He , водород H , криптон Kr

2. Совмещают вертикальную щель прибора питания для газоразрядных трубок со щелью коллиматорной трубки.

3. Включают питание прибора для газоразрядных трубок и устанавливают барабан спектро스코па на середину шкалы

4. Вставляют в футляр прибора питания трубок газоразрядную трубку с неоном (Ne), а затем с криптоном (Kr) и наблюдают спектры этих газов. Сравнивают спектры Ne и Kr . Убеждаются в их различии.

5. Вставляют в футляр источника питания газоразрядную трубку с гелием (He).

Внимание! Суммарное время работы трубки (He) около 45 минут, поэтому включать питание необходимо только в процессе эксперимента.

6. Измеряют положение всех видимых линий спектра He по шкале барабана и заносят их значения в табл. 3.25.

7. Строят градуировочный график зависимости длины волны от значения деления шкалы барабана (на миллиметровой бумаге), используя гелий (He) в качестве эталонного газа.

8. Вынимают трубку гелия (He) из футляра прибора и на ее место вставляют трубку с водородом (H). Проводят измерения положения всех видимых линий водорода по шкале барабана.

9. Используя градуировочный график, определяют длины волн и частоты линий видимого света в спектре водорода.

10. По данным измерений длин волн спектра водорода, используя соотношение (9) для каждой длины волны, вычисляют значение постоянной Ридберга R .

11. Вычисляют среднее значение R и определяют абсолютную и относительную погрешности. Результаты измерений записывают в табл.3.26.

12. Оформляют отчет о работе.

Таблица 3.25

№ линий	Цвет	Длина волны ($\text{\AA}$)	Деление барабана
1.	Красная	6678,2	
2.	Желтая	5875,6	
3.	Зеленая	5015,7	
4.	Зеленая	4921,9	
5.	Голубая	4713,1	
6.	Синяя	4471,5	

Таблица 3.26

№ линии	Обозначение линии	Деление барабана	Длина волны ($\text{\AA}$)	Частота (10^{15} Гц)	R	$R_{\text{ср}}$	ΔR
1.							
2.							
3.							
4.							

Контрольные вопросы

1. Какие типы спектров существуют, каково условие их возникновения?
2. Сформулировать постулаты Бора.
3. Что такое спектральная серия и как происходит ее образование?
4. Что такое энергия ионизации, ее численное значение для атома водорода.
5. В чем заключается сущность явления дисперсии света?
6. Объяснить устройство и принцип действия спектроскопа.
7. Почему для точных измерений с помощью спектроскопа щель коллиматора должна быть как можно тоньше?

Лабораторная работа А-5

Изучение треков заряженных частиц, полученных при помощи камеры Вильсона (по готовым фотографиям)

Для допуска к лабораторной работе курсанты должны уметь:

- объяснить процесс взаимодействия движущихся заряженных частиц с зарядами и магнитным полем;
- определить изменение импульса и кинетической энергии при взаимодействии с электрическим и магнитным полями;
- объяснить принцип работы камеры Вильсона;
- воспроизвести форму траектории заряженной частицы в камере Вильсона;
- воспроизвести процесс идентификации частиц по трекам в камере Вильсона.

Для подготовки к данной работе рекомендуется использовать: конспект лекций и практических занятий; учебники: (И.В. Савельев «Курс общей физики», т.3; Т.И. Трофимова «Курс физики»).

Цель работы: идентифицировать заряженные частицы по фотографиям в камере Вильсона.

Оборудование: фотографии треков заряженных частиц в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, линейка, циркуль, карандаш.

Краткие теоретические сведения

Пусть частица с зарядом $Z_e = Z \cdot e$ (Z – зарядовое число частицы, e – элементарный заряд, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) движется с большой скоростью v через вещество, и пролетает на некотором расстоянии r от электрона атома (рис. 3.53). Вследствие кулоновского взаимодействия с этой частицей электрон получает некоторой импульс $\Delta p = F \Delta t$ в направлении, перпендикулярном к линии движения частицы. Взаимодействие частицы и электрона наиболее эффективно во время прохождения его по отрезку траектории, ближайшему к электрону и сравнимому с расстоянием r , например, равному $2r$. Тогда в формуле $\Delta p = F \Delta t$ можно положить, что

Δt – то время, за которое частица проходит отрезок траектории $2r$, т.е. $\Delta t = \frac{2r}{v}$, а F – средняя сила взаимодействия частицы и электрона за это время.

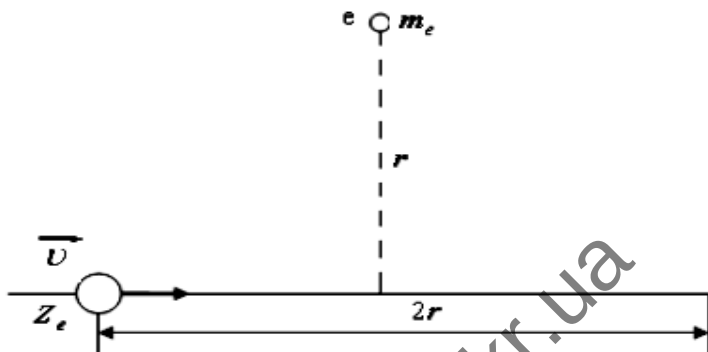


Рисунок 3.53

Сила F по закону Кулона прямо пропорциональна зарядам частицы Ze и электрона e и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Следовательно, сила взаимодействия

частицы с электроном приблизительно равна: $\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$

(приблизительно, так как в наших расчетах не учитывалось влияние ядра атома, а также электронов и ядер, входящих в другие атомы среды). Таким образом:

$$\Delta p \approx \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{2r}{v} = \frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0 rv}. \quad (1)$$

Итак, импульс, полученный электроном, прямо пропорционален заряду проходящей близ него частицы и обратно пропорционален скорости этой частицы.

При некоторой достаточно большой величине импульса электрон отрывается от атома и последний превращается в ион. На

каждой единице пути частицы через вещество образуется тем больше ионов, чем больше заряд частицы и чем меньше ее скорость. Отсюда следуют выводы, которые необходимо знать, чтобы уметь «прочитать» фотографию треков частиц.

1. При одинаковых условиях трек (т. е. след, образуемый частицей в среде и состоящий из ионизированных атомов этой среды) будет толще у той частицы, которая имеет больший заряд. Например, при одинаковых скоростях трек α -частицы толще, чем трек протона или электрона.

2. Если частицы имеют одинаковые заряды, то трек толще у той частицы, которая имеет меньшую скорость. Отсюда очевидно, что к концу движения трек частицы толще, чем в начале, так как скорость частицы уменьшается вследствие потери энергии на ионизацию атомов среды.

3. Исследуя значения толщины трека на разных расстояниях от радиоактивного препарата, обнаружили, что ионизирующее и другие действия заряженных частиц обрываются на некотором расстоянии, характерном для каждого типа частиц. Это расстояние называют **длиной пробега частицы**. Очевидно, длина пробега зависит от энергии частицы и плотности среды. Например, в воздухе при температуре 15 °С и нормальном атмосферном давлении пробег α -частицы, имеющий начальную энергию 4,6 МэВ, равен 3,3 см, а пробег α -частицы с начальной энергией 8,8 МэВ составляет 8,5 см. (1 МэВ (мегаэлектронвольт) – единица энергии, часто используемая в ядерной физике, 1 МэВ = $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж). В твердом же теле, например, в фотоэмульсии, пробег α -частицы с такой энергией равен нескольким десяткам микрометра.

Если камера Вильсона помещена в магнитном поле, то на движущиеся в ней заряженные частицы действует сила Лоренца, которая равна (для случая, когда скорость частицы перпендикулярна линиям поля):

$$F = Ze \cdot v \cdot B, \quad (2)$$

где Ze – заряд частицы, v – ее скорость и B – индукция магнитного поля.

Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости частицы и, следовательно, заставляет ее двигаться по окружности, радиус которой можно определить из уравнения:

$$Ze \cdot v \cdot B = \frac{m v^2}{R}, \quad (3)$$

где m – масса частицы, R – радиус кривизны ее траектории.

Отсюда

$$R = \frac{m v}{Ze \cdot B}. \quad (4)$$

Если частица имеет скорость, много меньшую, чем скорость света (т.е. частица не релятивистская), то ее кинетическая энергия

$T = \frac{mv^2}{2}$. Подставляя в эту формулу скорость частицы v из соотношения (4), имеем:

$$T = \frac{B^2 r^2 (Ze)^2}{2m}. \quad (5)$$

Из полученных формул следует сделать выводы, которые необходимо использовать для анализа фотографий треков частиц:

1. Радиус кривизны трека частице в магнитном поле зависит от массы, скорости и заряда частицы. Радиус тем меньше (т.е. отклонение частицы от прямолинейного движения тем больше), чем меньше масса и скорость частицы и чем больше ее заряд. Например, в одном и том же магнитном поле при одинаковых начальных скоростях отклонение электрона будет больше, чем отклонение протона, и на фотографии будет видно, что трек электрона – окружность с меньшим радиусом, чем радиус трека протона. Быстрый электрон отклонится меньше, чем медленный. Ион He^+ (т. е. атом гелия, из которого удален один электрон) в магнитном поле отклонится слабее, чем α -частица, т.к. при почти одинаковых массах этих частиц заряд α -частицы больше, чем заряд иона гелия. Из соотношения (5) между кинетической энергией частицы T и радиусом кривизны ее трека r видно, что отклонение от прямолинейного движения больше в случае, когда энергия частицы меньше.

2. Так как скорость частицы к концу пробега уменьшается, то уменьшается и радиус кривизны трека (увеличивается отклонение

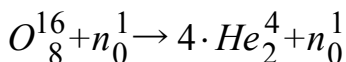
от прямолинейного движения). По изменению радиуса кривизны можно определить направление движения частицы – начало ее движения там, где кривизна трека меньше.

3. Измерив радиус кривизны трека и зная величину скорости частицы и индукцию магнитного поля, можно вычислить отношение заряда частицы к ее массе: Ze/m . Это отношение служит важнейшей характеристикой частицы и позволяет определить, что это за частица, т.е. установить ее идентичность известной частице.

Описание установки

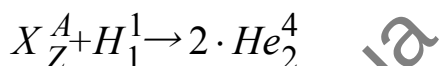
В лабораторной работе в качестве установки используют фотографию треков частиц, полученных при помощи камеры Вильсона. Камера Вильсона (1912 г.) – это старейший и на протяжении многих десятилетий (вплоть до 50-60-х гг.) единственный тип трекового детектора заряженных частиц. Она выполняется обычно в виде стеклянного цилиндра с плотно прилегающим поршнем. Цилиндр наполняется нейтральным газом (гелием или аргоном), насыщенным парами воды или спирта. При резком, т.е. адиабатическом, расширении газа пар становится пересыщенным и на траекториях заряженных частиц, пролетевших через камеру, образуются треки из мелких капелек жидкости (тумана). Центрами конденсации этих капелек служат ионы, образующиеся в результате взаимодействия пролетающих заряженных частиц с атомами и молекулами паров и газов, находящихся в камере.

Образовавшиеся треки фотографируются стереоскопически, т.е. под разными углами. Если в камере Вильсона произошла реакция распада ядра атома, то по трекам частиц – продуктов распада можно установить, какое ядро распалось. Для этого нужно использовать закон сохранения зарядового числа (являющийся следствием закона сохранения электрического заряда) и закон сохранения массового числа (следствие закона сохранения числа нуклонов). Рассмотрим, например, реакцию взаимодействия ядра атома кислорода с нейтроном:



В этой реакции сумма зарядовых чисел частиц, вступающих в нее, равна 8 ($8+0$) и суммарное зарядовое число частиц – продуктов реакции также равно 8 ($4 \cdot 2 = 8$). Полное массовое число слева равно 17 ($16 + 1$), справа это число также равно 17 ($44 + 1$).

Таким образом, если неизвестно, какое ядро распалось, то можно вычислить его зарядовое число по известным зарядовым числам частиц – продуктов распада с помощью простых арифметических расчетов и, затем, по таблице элементов Д.И. Менделеева определить этот элемент. Закон сохранения массового числа позволит установить, какому изотопу этого элемента принадлежит ядро. Например, в реакции:



$Z = 2 \cdot 2 - 1 = 3$ и $A = 2 \cdot 4 - 1 = 7$, следовательно, X_Z^A есть изотоп лития Li_3^7 .

Для определения отношения заряда к массе частицы III приравняйте, используя формулу (5), величину ее скорости к скорости протона (частица I), т.к. по условию эти скорости одинаковы:

$$\frac{Z_{III}e \cdot R_{III}B}{m_{III}} = \frac{Z_I e \cdot R_I B}{m_I}, \quad (6)$$

откуда

$$\frac{Z_{III}e}{m_{III}} = \frac{R_I e}{m_p R_{III}}, \quad (7)$$

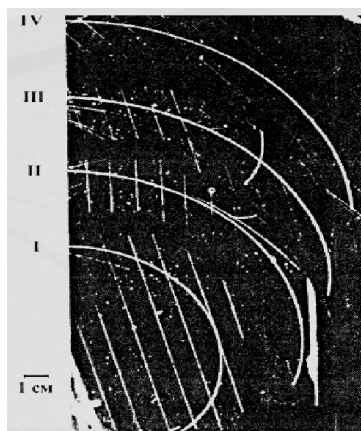
где $Z_{III}e$ – заряд частицы III, m_{III} – ее масса, $m_p = m_I$ – масса протона, $Z_I = 1$ – его зарядовое число.

Недостаток камеры Вильсона – это малое рабочее время, составляющее примерно 1% от времени, затрачиваемого для подготовки камеры к последующему расширению (выравнивание температуры и давления, рассасывание остатков треков, насыщение паров), а также трудоемкость обработки результатов.

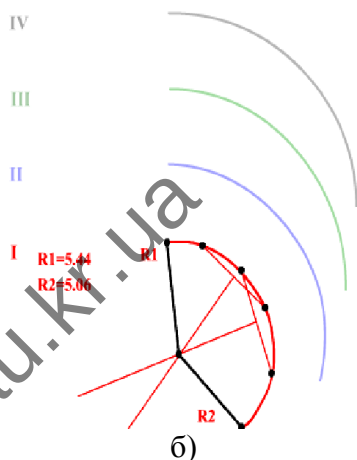
Ход работы

1. Определяют направление вектора индукции магнитного поля (пользуясь, правилом левой руки). Вектор индукции магнитного поля равен 2,17 Тл.

2. Накладывают на фотографию лист прозрачной бумаги и переводят на нее форму трека (рис.3.54,а)).



а)



б)

Рисунок 3.54

3. Чертят, как показано на рис. 3.54,б, две хорды и восстанавливают к ним перпендикуляры (через середины). Пересечение хорд даст центр окружности, радиус которой измеряют линейкой (с учетом масштаба фотографии).

4. Зная, что трек I принадлежит протону, находят в таблице учебника значение его заряда и массы и по формуле (5) вычисляют величину энергии.

5. Измеряют радиус кривизны трека частицы III в начале ее пробега, зная, что начальная скорость этой частицы равна начальной скорости протона (нижний трек), вычисляют для частицы III отношение заряда к массе по формуле (7). По полученному значению определяют, ядром какого элемента является эта частица.

6. Остальные треки принадлежат ядрам дейтерия и трития. Определяют, какому именно ядру принадлежит трек II и трек IV?

7. Делают выводы и оформляют отчет.

Контрольные вопросы

1. Объясните, почему траектории частиц представляют собой дуги окружности? Какова причина различия траектории разных ядер?

2. Выведите уравнение (3).

3. Почему кривизна каждой траектории меняется от начала к концу пробега частицы?

4. Объясните причины различия в толще треков разных ядер. Почему трек каждой частицы толще в конце пробега, чем в его начале?

5. Как производится оценка величины импульса частицы при кулоновском соударении?

www.klapau.kr.ua

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

1. Трофимова Т. И. Курс физики : [учеб. пособие для вузов] / Т.И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 560 с.
2. Фоменко В. В. Курс загальної фізики: Модуль 1. Класична механіка : [навч. посібник] / В. В. Фоменко. – Кіровоград : ДЛАУ, 2007. – 124 с.
3. Фоменко В. В. Курс загальної фізики: Модуль 2. Молекулярна фізика і термодинаміка : [навч. посібник] / В. В. Фоменко. – Кіровоград : ДЛАУ, 2012. – 88 с.
4. Борота В. Г. Механика и молекулярная физика : методические рекомендации к выполнению лабораторных работ по физике на базе комплекта «L – микро» / В. Г. Борота, О. С. Кузьменко, С. А. Остапчук. – 2-е изд., перераб. и доп. – Кіровоград : КЛА НАУ, 2012. – 100 с.
5. Савельев И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – Т. 1 – 5.

Для заметок

www.klanau.kr.ua

Навчально-методичний посібник
ФИЗИКА.
ПОСОБИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
(російською мовою)

Автори: *Бурмистров А.Н., Борота В.Г., Ковалев Ю.Г.,
Кузьменко О.С., Фоменко В.В.*

Редактор: *Сушкова Л.В.*
Технічний редактор: *Будулатій В.П.*
Комп'ютерна верстка: *Бур'янський С.В.*

Підписано до друку
Формат 60х84 1/16. Папір газетний. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк.
Свідоцтво держ. реєстру ДК № 1963 від 07.10.2004 р.
Зам. № /2013 Тираж 400 прим.

Кіровоградська льотна академія
Національного авіаційного університета
Видавництво, м. Кіровоград,
вул. Добровольського, 1,
тел. 394-437.