

В.М. Анисимов, Г.Э. Солохина

**Методические указания к лабораторным
работам и темы докладов по курсу**

**«КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»**

Москва

ББК 20

Анисимов В.М., Солохина Г.Э.

Лабораторные работы по курсу «Концепции современного естествознания».

Данное пособие разработано в соответствии с программой курса «Концепции современного естествознания» (КСЕ) и предназначено для студентов факультетов, в учебные планы которых включен этот курс.

Цель лабораторного практикума – дать возможность студентам ознакомиться с приборами и инструментами, некоторыми физическими явлениями и основами их моделирования. В процессе выполнения лабораторных работ студенты изучают технику эксперимента, основы анализа измеряемых величин и их размерностей, взаимосвязь прямых и косвенных измерений, а также проводят необходимую математическую обработку полученных результатов.

По математическому уровню практикум соответствует математической подготовке студентов младших курсов МАИ.

Предназначено для студентов дневного и вечернего отделений.

@ В.М. Анисимов, Г.Э. Солохина

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
Р А З Д Е Л 1	7
Основные принципы и методы естественнонаучного познания ..	7
1.1 Экспериментальная достоверность и концепция измерений ---	8
1.2 Метод и концепция моделирования объектов	9
ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ 1	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 0	11
Определение плотности твердых тел правильной геометрической формы и расчет погрешностей	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	23
Измерение ускорения свободного падения с помощью математического и обратного (физического) маятников	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13	29
Исследование свободных колебаний пружинного маятника	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14	33
Исследование крутильных колебаний	33
Р А З Д Е Л 2	38
Образ природы в классическом естествознании: корпускулярная концепция	38
2.1. Модель корпускулы и ньютоновская механика	38
2.2. Свойства пространства - времени и законы сохранения	40
ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ 2	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25(Ф)	42
Определение коэффициента сопротивления жидкой среды движению шарика	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5А	45
Изучение неупругого удара шаров	45
Р А З Д Е Л 3	51
Образ природы в классическом естествознании: континуальная концепция	51
3.1. Модель поля и электродинамика Максвелла	51
3.2. Электромагнитные волны, явления волновой оптики	53
ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ 3	54
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 60	55
Изучение электростатического поля	55
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 64	60
Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла ..	60

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 78 -----	64
Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс–буссоли -----	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 65 -----	68
Изучение явления взаимной индукции-----	68
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 76 -----	73
Изучение явления электромагнитной индукции -----	73
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 109-----	77
Определение длин волн света при помощи бипризмы Френеля-----	77
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 110-----	82
Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона	82
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 114-----	87
Изучение дифракционного спектра и определение длины световой волны -----	87
Р А З Д Е Л 4-----	93
Образ природы в неклассическом естествознании -----	93
4.1. Квантовая концепция в неклассической физике -----	93
4.2. Квантовая физика и развитие современной цивилизации ----	97
ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ 4-----	99
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 120-----	100
Исследование излучения абсолютно черного тела -----	100
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 122 -----	103
Изучение внешнего фотоэффекта -----	103
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 127-----	105
Определение постоянной Планка -----	105
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 132 -----	109
Исследование параметров полупроводникового кристаллического диода -----	109
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 136/137 -----	113
Определение чувствительности фотоэлемента и фотосопротивления -----	113
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 170-----	118
Определение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках -----	118
Р А З Д Е Л 5-----	124
Термодинамика и концепция самоорганизации природных систем-----	124
5.1. Методы описания многочастичных систем-----	124
5.2 Начала термодинамики. Энтропия -----	127
5.3. Второе начало термодинамики и эволюционная парадигма	129
ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ 5-----	131

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 33 -----	131
Определение универсальной газовой постоянной -----	131
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 29(к) -----	134
Распределение Максвелла -----	134
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36(к) -----	140
Адиабатический процесс -----	140
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35 -----	144
Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме методом Клемана - Дезорма -----	144
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43 -----	150
Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме методом интерференции -----	150
ТЕМЫ ДОКЛАДОВ-----	155
1 СЕМЕСТР -----	155
2 СЕМЕСТР -----	156
ЛИТЕРАТУРА-----	158

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум является необходимой составной частью учебного процесса по курсу «Концепции современного естествознания» (КСЕ) и предназначен для студентов факультетов, в учебные планы которых включен этот курс.

Программа курса КСЕ предполагает использование возможностей современного лабораторного практикума (на кафедре физики МАИ) для более глубокого понимания некоторых разделов курса, в частности, основ классической и современной физики, как базы естествознания. Это учитывалось при отборе лабораторных работ из общего физического лабораторного практикума.

Настоящее учебное пособие состоит из 5 разделов. Каждый раздел включает в себя краткие теоретические предпосылки по соответствующим темам курса и описания лабораторных работ. Приведены контрольные вопросы по теоретическому введению и содержанию лабораторных работ.

Теоретическая составляющая пособия разработана с учетом опыта чтения лекций доц. Г.Э. Солохиной по курсу «Концепции современного естествознания» студентам экономического факультета МАИ. Структура пособия, его содержание и оформление выполнены с учетом опыта по подготовке учебных пособий «Лабораторные работы по физике» для студентов дневного и вечернего отделений МАИ разных лет.

В заключительной части пособия приводятся примерные темы докладов, которые могут быть подготовлены студентами для обсуждения в ходе практических занятий по курсу.

Авторы будут признательны за критические замечания и рекомендации, которые послужат улучшению качества этой работы.

РАЗДЕЛ 1

Основные принципы и методы естественнонаучного познания

В течение многих веков, изучая окружающий мир природы и самого себя, человек разумный выстроил целостную систему знаний об окружающем мире - науку.

Наука - это система достоверных, обобщенных и логически взаимосвязанных знаний.

Естествознание можно определить, как *науку о явлениях и законах природы*, оно является феноменом общечеловеческой культуры.

Главная цель естественнонаучного познания: на основе базовых понятий и представлений объяснить наблюдаемое разнообразие природных явлений и объединить их в целостную, логически непротиворечивую картину мира. Важно понимать, что **картина мира** – это наше представление о нем, которое постоянно уточняется.

Человек в процессе познания выступает в двух качествах: в качестве исследователя и в качестве объекта исследования. Природа и человек, человеческое общество исторически воспринимались как два самостоятельных элемента.

Соответственно, в науке выделились две обширные и самостоятельные области:

1. Естественные науки
2. Гуманитарные и социальные науки.

Остановимся подробнее на первой. Объект изучения естественных наук: все формы и структуры неживой и живой природы.

Три основных положения естественнонаучного познания:

1. Любое естественнонаучное знание относительно.

Во-первых, наше знание – это только картина мира, т.е. наше представление о нем.

Во-вторых, большинство современных теорий имеет свои границы применимости – «всеобщих» законов совсем не много.

Например, классическая механика Ньютона описывает движение частиц, объектов и тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме.

2. В основе естественнонаучного познания, как и в явлениях природы, лежит причинно-следственная связь.

В современном понимании причинность означает связь между отдельными состояниями видов и форм материи в процессе ее

движения и развития. Т.е. любое событие имеет свою причину в предшествующих состояниях и событиях.

Знание свойств познаваемого объекта, как правило, означает, что выяснено:

- а) чем обусловлено свойство,
- б) в чем его сущность
- в) к чему оно приведет.

3. Истинность естественнонаучных знаний подтверждается экспериментом, опытом.

Расширение, уточнение знаний о явлениях природы производилось людьми посредством наблюдений, а на более высокой стадии развития посредством экспериментов, воспроизведением явлений в искусственной обстановке.

В ходе **наблюдения** исследователь не воздействует на изучаемое явление или объект, а лишь получает информацию о них. Часто представление о полной независимости объекта и субъекта исследования оправданно, но, строго говоря, является классической идеализацией.

1.1 Экспериментальная достоверность и концепция измерений

В процессе познания могут применяться различные *методы исследования*: экспериментальный, инструментальный, метод наблюдения, математический, метод моделирования объектов и т.д.

Экспериментом называется изучение явления при его воспроизведении в контролируемых условиях. Т.е. экспериментатор сам организует модель исследуемого явления, имея хорошо осознанную цель.

Эксперимент должен обладать качеством воспроизводимости в пределах той погрешности, в которой он выполнен.

Получение числовой информации об изучаемом объекте в ходе наблюдения или эксперимента называют **измерением**. Измерение выполняют методом сопоставления измеряемой величины с некоторой другой, неизменной величиной, называемой **эталон**ом.

Измерительный прибор представляет собой макроскопический объект, который служит посредником между явлением, которое изучается, и органами чувств человека. Использование прибора уменьшает вероятность искаженного восприятия явления из-за несовершенства органов чувств человека. (В качестве примера субъективности нашего

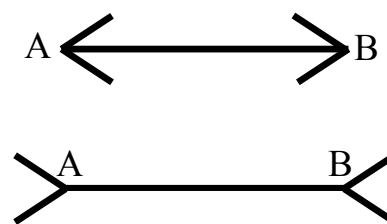


Рис. 1.1

восприятия можно привести две фигуры, изображенные на рис.1.1, у которых расстояния АВ одинаковы).

Кроме того, приборы расширяют познавательные возможности человека. Правильно подобранный прибор создает как бы идеальный канал: «объект – прибор – исследователь». В процессе измерений всегда действует множество факторов, приводящих к искажению результата измерения. Степень искажения результата характеризуют величиной **погрешности** измерения.

Более подробно виды погрешностей и методы их расчета будут рассмотрены в лабораторной работе № 0.

1.2 Метод и концепция моделирования объектов

И при экспериментальном и при теоретическом исследовании реальные объекты и процессы всегда заменяются их образами, представлениями о них, иными словами – **моделями**.

*Термин «модель» обозначает некий материальный или мысленный образ изучаемого объекта или прообраз некоторого объекта, создаваемого человеком. Создание, а затем изучение этих вспомогательных объектов называется **моделированием**.*

Моделирование – это метод естествознания, для которого характерно отбрасывание несущественного, «лишнего», что мешает восприятию главного. Любая модель упрощает изучаемые с ее помощью объекты-оригиналы *.

Существует два вида моделирования: *материальное и идеальное* (см. рис.1.2)

При **материальном моделировании** ценность модели обусловлена именно ее материальной основой: частным случаем материального моделирования является естественнонаучный эксперимент, а также: лабораторный эксперимент, макеты, образцы изделий (например, испытания макетов автомобилей при авариях).

При **идеальном моделировании** изучаемый объект заменяется мысленным представлением о нем, это представление часто оформляют в условном, символическом виде (например, математическая запись). Ценность идеальной модели обусловлена именно мыслью (представлением, идеей), заключенной в ней.

Следует заметить, что в наше время *математическое и компьютерное* моделирование играют особую роль. Современная естественнонаучная теория, как правило, содержит в качестве важнейшего элемента математическую модель явления.

* Л. Ландау: «Главное в физике - это умение пренебрегать».



Рис. 1.2

Для примера на рис.1.3 показаны материальная и идеальная (математическая) модели гармонического осциллятора (тела, совершающего колебания по гармоническому закону).

Гармоническим колебательным движением называется периодическое движение, при котором смещение x точки от положения равновесия в зависимости от времени t изменяется по закону синуса или косинуса:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \alpha), \quad (1.1)$$

где A - амплитуда колебания (максимальное абсолютное значение

x); ω_0 - круговая частота гармонических колебаний; $(\omega_0 t + \alpha)$ - фаза колебаний; α - начальная фаза (фаза колебаний в момент времени $t = 0$).

Можно показать, что выражение (1.1) является решением так называемого *дифференциального уравнения гармонических колебаний*

$$x'' + \omega_0^2 x = 0. \quad (1.2)$$

где x'' - вторая производная от смещения x по времени t .

Уравнения (1.1) и (1.2) представляют собой математическую модель гармонических колебаний. Такие колебания могут происходить в системах при отсутствии сил сопротивления и трения в случае, если

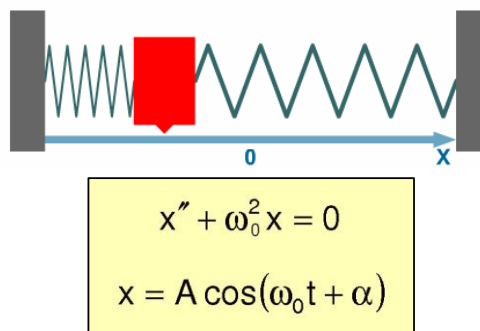


Рис. 1.3

равнодействующая сила направлена к положению равновесия системы и прямо пропорциональна смещению тела от положения равновесия, т.е. имеет вид $F = -kx$.

Более подробно использование материальных и идеальных моделей будет рассмотрено в лабораторных работах №№ 2, 13, 14 на примере различных маятников, совершающих гармонические колебания.

Вопросы по разделу 1

1. Дайте определение термину «наука». Какие две основные области науки Вы знаете?
2. В чем заключаются основные положения естественнонаучного познания?
3. Что является основным критерием истинности естественнонаучных знаний?
4. Дайте определение терминам «наблюдение» и «эксперимент».
5. В чем заключаются два основных условия эксперимента?
6. Что означает термин «измерение»?
7. Что такое погрешность эксперимента?
8. Дайте определение термину «модель».
9. Что такое идеальная модель явления? Приведите примеры.
10. Что такое материальная модель явления? Приведите примеры.
11. В чем заключаются идеальная и материальная модели гармонического осциллятора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 0

Определение плотности твердых тел правильной геометрической формы и расчет погрешностей

Приборы и оборудование:

- 1) штангенциркуль
- 2) микрометр
- 3) технические весы
- 4) разновески
- 5) полый цилиндр, или прямоугольная пластина, или цилиндр переменного диаметра.

Некоторые измерительные инструменты и приборы

Штангенциркуль

С его помощью измеряют внешние и внутренние размеры тел, глубину отверстий в них. На рис.1.4 изображен один из штангенциркулей. 1 - штанга с делениями ценой в 1 мм, 2 - подвижная

часть со шкалой нониуса с ценой деления 0,1 мм, 3 - тела, размеры которых измеряются, 4 - зажимной винт.

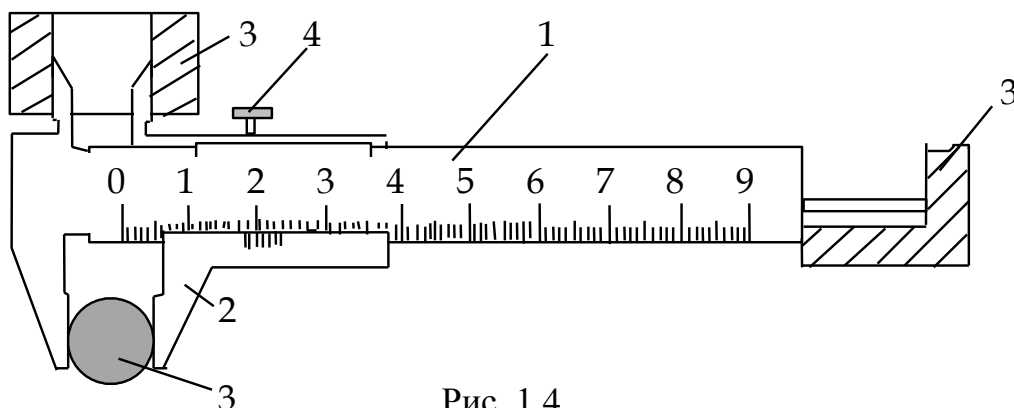


Рис. 1.4

Пример измерения линейного размера показан на рис.1.5:

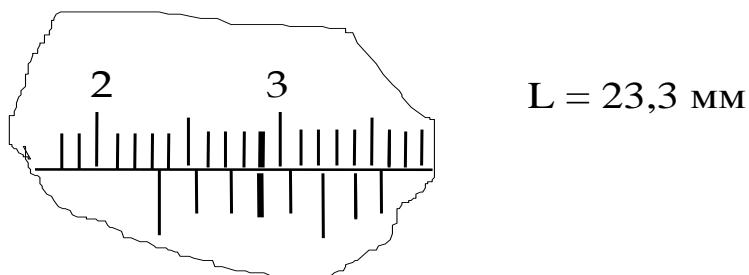


Рис. 1.5

Правила измерений

1. Проверить совпадение нуля основной шкалы с нулем нониуса.
2. Измеряемый предмет 3 расположить между губками и сдвинуть рамку до соприкосновения губок с предметом.
3. Винтом 4 закрепить рамку и произвести отсчет.

Измеряемый размер равен целому числу делений основной шкалы на штанге (до нуля нониуса) плюс точность нониуса, умноженная на порядковый номер деления нониуса, совпадающего с одним из делений на штанге. Если ни одно из делений нониуса не совпадает точно с каким-либо штрихом основной шкалы, то берут то деление, которое ближе всего к делению основной шкалы.

Микрометр

Микрометр (рис.1.6) служит для измерения небольших внешних линейных размеров с более высокой точностью, чем позволяет штангенциркуль. Применяемые в лаборатории микрометры имеют

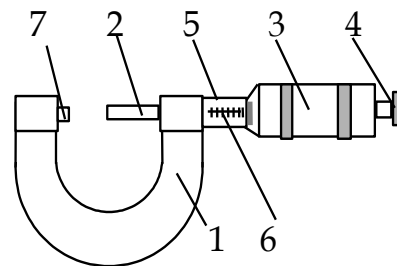


Рис. 1.6

точность 0,01 мм. Измерительным элементом микрометра служит винтовая пара, которая преобразует небольшие линейные перемещения микрометрического винта в значительные угловые перемещения барабана.

Основные детали микрометра: скоба 1 и микрометрический винт 2. Продольное перемещение винта осуществляется барабаном 3. Для точных измерений необходимо, чтобы на измеряемое тело при каждом измерении действовала со стороны винта постоянная сила. Для этого служит специальное устройство, размещенное внутри барабана. Последний при измерениях вращается при помощи трещотки 4, которая при достижении установленного усилия микрометрического винта на измеряемую деталь проворачивается относительно барабана.

На стемель 5 нанесен продольный штрих 6, снизу от него - миллиметровая шкала, а сверху - штрихи, делящие каждый миллиметр пополам. На барабан нанесена круговая шкала из 50 делений. Один полный оборот барабана соответствует продольному перемещению микрометрического винта на 0.5 мм, а поворот барабана на одно деление - перемещению на 0.01 мм.

Указателями служат для барабана продольный штрих 6 на стемеле, а для продольной шкалы - торец барабана.

Правила измерений

1. Проверить микрометр - довести трещоткой винт до упора, при этом на обеих шкалах должно быть нулевое показание.

2. Провести измерение. Для этого поместить измеряемую деталь между микрометрическим винтом 2 и пяткой 7, неподвижно закрепленной в скобе. Вращать трещотку до тех пор, пока микрометр не зажмет измеряемую деталь и трещотка не начнет проворачиваться относительно барабана (при вращении трещотки барабан не вращается).

3. Произвести отсчет. Для этого по шкале на стемеле определить целое или полуцелое число миллиметров и добавить к нему число сотых долей миллиметра, отсчитанное по шкале барабана.

Для примера на рис.1.7 показано положение шкал при измеряемой длине 5.62 мм.

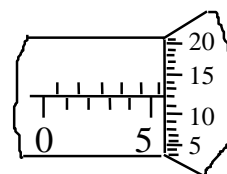


Рис. 1.7

Технические весы

Весы состоят из основания 1 (рис.1.8) и жестко скрепленной с ним колонки 2, в верхней части которой закреплена призма, на которую опирается коромысло 3. К последнему подвешены чашки весов 4.

При уравновешенных весах коромысло устанавливается горизонтально, и прикрепленная к нему стрелка 5 находится против середины шкалы 6.

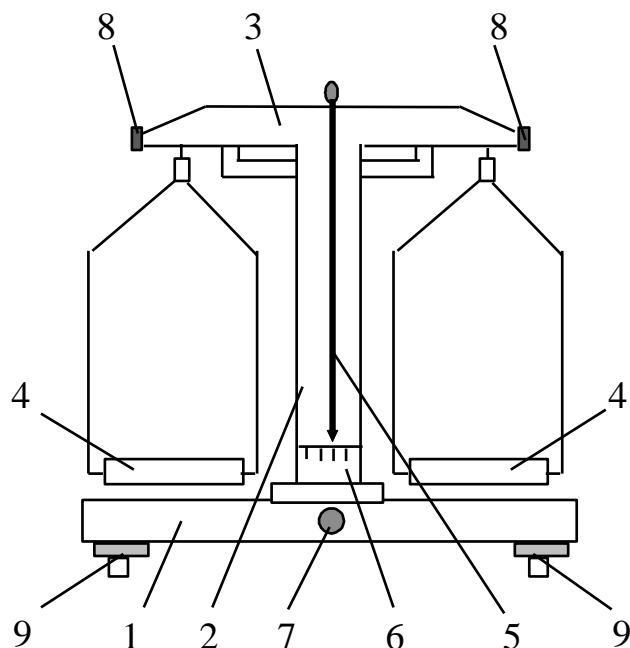


Рис. 1.8

Винт 7 служит для арретирования весов. Арретирование заключается в том, что особое устройство при повороте винта 7 приподнимает коромысло с призмы и фиксирует его в таком положении. Благодаря этому между взвешиваниями на призму не действуют никакие силы и она меньше изнашивается.

Подготовка весов к работе.

1. Проверить по отвесу правильность установки весов (вертикальность колонки 2). В случае необходимости добиться вертикальности колонки, вращая установочные винты 9.

2. Проверить положение стрелки весов 5. Если она не устанавливается при ненагруженных разарретированных весах против середины шкалы 6, то добиться этого следует осторожным вращением в присутствии лаборанта регулировочных грузов 8. Вращение производить при арретированных весах.

Правила взвешивания

1. Взвешиваемое тело и разновески класть на чашки и снимать с них нужно только при арретированных весах.

2. При взвешивании разновески помещают только на свободную от тела чашку весов. Причем начинать нужно с разновесков большей массы.

3. Пока не достигнуто предварительное равновесие, нельзя полностью разарретировать весы. Поэтому винт 7 поворачивают только частично и, заметив, что стрелка явно уходит в сторону, возвращают винт в исходное положение. После этого меняют вес разновесков в зависимости от направления движения стрелки.

4. Разновески следует ставить так, чтобы их общий центр тяжести приходился на середину чашки.

5. После достижения равновесия весы необходимо заарретировать.

Погрешности измерений физических величин

Краткая теория

Различают *прямые* и *косвенные* измерения. При **прямых измерениях** искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Например: измерение длины линейкой или штангенциркулем, измерение температуры термометром и т.д.

При **косвенных измерениях** искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, получаемыми прямыми измерениями. Например, определение плотности тела по измерениям его массы и геометрических размеров.

Прямые измерения

В зависимости от причин, их вызывающих, ошибки измерения делят на случайные, систематические и грубые.

Под **случайными ошибками** понимают ошибки, значения которых меняются от одного измерения к другому. Величина их не может быть установлена до опыта. Их возникновение вызвано неточностью измерения (случайными ошибками экспериментатора, неточным соблюдением методики измерения и т.д.) и непостоянством самой измеряемой величины (например, диаметра цилиндра или толщины пластины).

Систематическая погрешность - это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Она может быть учтена или исключена изменением метода измерения, введением поправок к показаниям приборов, учетом систематического влияния внешних факторов и т.п.*

Грубые ошибки (промахи) являются также случайными, однако причиной грубых ошибок обычно являются неисправность измерительной техники или ошибки в работе экспериментатора. Поэтому, когда грубые ошибки значительны, они обнаруживаются без большого труда и этот результат должен быть исключен.

Основным объектом изучения теории ошибок являются случайные ошибки при отсутствии систематических ошибок. Если какая-либо

* Например: поправка, связанная с изменением длины измерительной линейки и тела в результате теплового расширения.

величина измеряется в одинаковых условиях несколько раз, то возникает необходимость в статистической обработке результатов измерений этой величины, чтобы учесть и оценить случайные ошибки.

Обозначим x_0 не известное нам точное значение измеряемой величины.

Произведя n измерений, получим $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - значения измеряемой величины, которые называются результатами наблюдения. Величины x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) отличаются друг от друга и от x_0 . Если величины x_i измерены с одинаковой точностью, то для оценки x_0 применяют среднее арифметическое значение результатов наблюдений:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (1.3)$$

Среднее арифметическое \bar{x} называется результатом измерений. Поскольку величины результатов наблюдений x_i носят случайный характер, то результат измерения – величина \bar{x} – тоже будет случайной величиной; и отклонения от \bar{x} результатов наблюдения x_i будут случайными:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1.4)$$

Следует отметить, что величина Δx_i значительно меньше величины x_i . При большом числе измерений влияние каждого отдельного результата наблюдения x_i на величину \bar{x} примерно равноценно.

Абсолютная погрешность результата измерений Δx , равная отклонению \bar{x} от x_0 , тоже будет величиной случайной:

$$\Delta x = \bar{x} - x_0. \quad (1.5)$$

Так как величина x_0 нам не известна, оценим величину Δx через Δx_i . Δx состоит из многих случайных величин Δx_i , из которых ни одна не доминирует над остальными. При этом условии случайные погрешности Δx_i подчиняются нормальному закону распределения Гаусса, который можно записать в виде

$$\varphi(\Delta x_i) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta x_i^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.6)$$

где функция $\varphi(\Delta x_i)$ носит название функции Гаусса, σ - средняя квадратическая погрешность результата наблюдения.

Для серии n измерений среднеквадратичную погрешность наиболее точно можно оценить по формуле

$$\bar{\sigma}_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (1.7)$$

Эта формула тем справедливее, чем больше число измерений. Однако в 1908 г. В. Госсет (псевдоним «Стьюдент») доказал, что статистический подход справедлив и при малом числе измерений.

Остановимся на понятии **доверительная вероятность w** измерений. Выбранное значение доверительной вероятности (например, $w = 0,9$) означает, при достаточно большом числе измерений примерно 90% их приведет к результатам, отличающимся от истинного не более, чем на $\pm \bar{\sigma}_x$. Понятно, что большее значение доверительной вероятности соответствует большему значению погрешности наших измерений.

Доверительную границу погрешности Δx для заданной w и при малом n определяют по формуле

$$\Delta x_{гр} = t_{w,n} \cdot \bar{\sigma}_x, \quad (1.8)$$

где $t_{w,n}$ - коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности w и числа измерений n , находится по табл. 1.1 для заданных w и n .

Таблица 1.1
Значения коэффициента Стьюдента

n	w			n	w		
	0.9	0.95	0.99		0.9	0.95	0.99
2	6.3	12.7	63.7	7	1.9	2.4	3.7
3	2.9	4.3	9.9	8	1.9	2.4	3.5
4	2.4	3.2	5.8	9	1.9	2.3	3.4

Обычно в лабораторных работах считается достаточной доверительная вероятность $w = 0.9$.

Окончательный результат измерения представляется в виде:

$$\bar{x}; \Delta x_{гр} \text{ от } (-t_{w,n} \cdot \bar{\sigma}_x) \text{ до } (+t_{w,n} \cdot \bar{\sigma}_x); w, \quad (1.9)$$

что означает: измеряемая величина принадлежит интервалу значений $(\bar{x} - t_{w,n} \bar{\sigma}_x; \bar{x} + t_{w,n} \bar{\sigma}_x)$ с доверительной вероятностью w .

Для сравнения точности измерений величин обычно вычисляется относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta x_{гр}}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (1.10)$$

По величине относительной погрешности удобно сравнивать и результаты измерений однородных величин.

Косвенные измерения

Обычно приходится вычислять искомую величину по результатам измерений других величин, связанных с этой величиной определенной функциональной зависимостью. Такие измерения называются косвенными. Например, плотность тела (пластины) ρ определяется через массу тела и его объем:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{L \cdot b \cdot h},$$

где L, b, h - линейные размеры пластины.

Величины m, L, b, h можно измерить, а затем вычислить плотность ρ .

Итак, чаще всего искомая величина является функцией нескольких переменных:

$$A = f(x, y, z, \dots) \quad (1.11)$$

Если величины x, y, z, \dots случайны, то A тоже будет случайной величиной.

Из теории вероятностей известно, что среднее значение функции случайной величины приближенно равно функции от средних значений ее аргументов при условии, что погрешности измерений аргументов $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$ малы по сравнению с величинами x, y, z, \dots . То есть можно записать

$$\bar{A} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots), \quad (1.12)$$

где \bar{A} - среднее значение величины A , $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$ - средние значения величин x, y, z, \dots (см формулу 1.3).

Для оценки доверительной границы случайной погрешности косвенного измерения можно использовать приближенный метод, который заключается в следующем. Если распределения величин x_i, y_i, z_i, \dots нормальные (i - порядковый номер измерения), то распределение величины A_i тоже будет нормальным, поэтому для определения доверительной границы случайной погрешности косвенного измерения $\Delta A_{гр}$ можно применить метод обработки случайных погрешностей прямых измерений.

С этой целью найдем значения

$$A_i = f(x_i, y_i, z_i, \dots) \text{ и } \bar{A} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1.13)$$

для каждого номера измерений.

Аналогично формуле (1.4) рассчитаем величины ΔA_i :

$$\Delta A_i = A_i - \bar{A}. \quad (1.14)$$

Доверительная погрешность $\Delta A_{гр}$ при малом числе измерений (расчетов) определяется аналогично формулам (1.7), (1.8):

$$\Delta A_{\text{гр}} = t_{w,n} \overline{\sigma}_A = t_{w,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (1.15)$$

где $t_{w,n}$ - коэффициенты Стьюдента (см. табл.1.1) для заданных w и n .

Результат косвенного измерения величины A представляется в форме A ; ΔA от $(-t_{w,n} \cdot \overline{\sigma}_A)$ до $(+t_{w,n} \cdot \overline{\sigma}_A)$; w . (1.16)

Относительная величина случайной погрешности косвенного измерения определяется, как и в случае прямых измерений, по формуле

$$\delta_{\overline{A}} = \frac{\Delta A_{\text{гр}}}{\overline{A}} \cdot 100\%. \quad (1.17)$$

Методика измерений

Плотностью тела называется величина, измеряемая массой вещества, заключенной в единице объема тела.

Средняя плотность выражается формулой

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.18)$$

где m - масса тела, V - объем тела. Единицей плотности является 1 кг/м^3 .

Масса - физическая величина, одна из основных характеристик материи, определяющая ее инерционные и гравитационные свойства. В соответствии с принципом эквивалентности инертная и гравитационная массы численно равны.

Весом тела называют силу, с которой тело вследствие его притяжения к Земле действует на связь (опору или подвес). Поэтому можно определять массу тела взвешиванием на рычажных весах. При этом сравнивают веса тела и разновесков. Когда весы уравновешены, можно утверждать, что вес тела равен весу разновесков. Но если равны веса тел, то равны и их массы. Так как на разновесках указаны именно массы, то массу тела мы определяем, просто сложив числа, указанные на разновесках.

Порядок выполнения работы

I. Тело - полый цилиндр (рис.1.9).

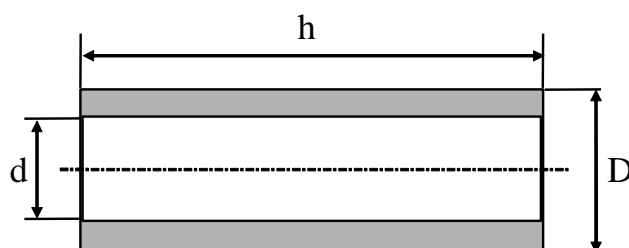


Рис. 1.9

Плотность ρ вещества цилиндра определяется по формуле

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi(D^2 - d^2) \cdot h}. \quad (1.19)$$

1. Определить исправность штангенциркуля. Для этого привести в соприкосновение его губки и убедиться в совпадении нулевой точки нониуса с нулем масштабной линейки штангенциркуля.

2. Измерить штангенциркулем высоту h , наружный D и внутренний d диаметры цилиндра 3...5 раз в разных плоскостях.

3. Определить массу m цилиндра трехкратным взвешиванием на технических весах.

4. Результаты измерений занести в табл.1.2. Рассчитать средние значения величин.

5. Вычислить среднюю плотность $\bar{\rho}$ вещества по формуле

$$\bar{\rho} = \frac{4\bar{m}}{\pi(\bar{D}^2 - \bar{d}^2) \cdot \bar{h}}, \quad (1.20)$$

где $\bar{m}, \bar{d}, \bar{D}$ – средние значения величин.

Плотность находить в г/см^3 и кг/м^3 .

6. Вычислить доверительную и относительную погрешности измерения по формулам (1.15) и (1.17).

II. Тело - сплошной цилиндр переменного сечения (рис.1.10).

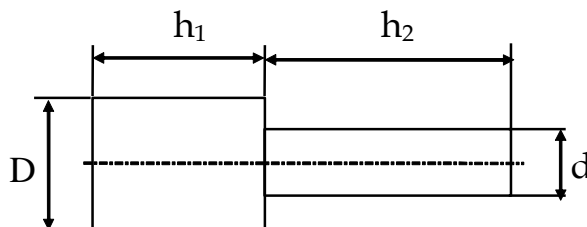


Рис. 1.10

Плотность ρ вещества цилиндра определяется по формуле

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi(D^2 h_1 + d^2 h_2)}. \quad (1.21)$$

1. Проверить исправность штангенциркуля. Для этого привести в соприкосновение его губки и убедиться в совпадении нулевой отметки нониуса и штангенциркуля.

2. Измерить штангенциркулем диаметры D и d и высоты h_1 и h_2 три раза в разных плоскостях. Результаты занести в табл.1.3. Рассчитать средние значения величин.

Таблица 1.2

№ п/п	D_i мм	ΔD_i мм	$(\Delta D_i)^2$ мм ²	d_i мм	Δd_i мм	$(\Delta d_i)^2$ мм ²	h_i мм	Δh_i мм	$(\Delta h_i)^2$ мм ²	m_i г	Δm_i г	$(\Delta m_i)^2$ г ²	ρ г/см ³
1													—
2													—
3													—
Среднее													

Таблица 1.3

№ п/п	D_i мм	ΔD_i мм	$(\Delta D_i)^2$ мм ²	d_i мм	Δd_i мм	$(\Delta d_i)^2$ мм ²	h_{1i} мм	Δh_{1i} мм	$(\Delta h_{1i})^2$ мм ²	h_{2i} мм	Δh_{2i} мм	$(\Delta h_{2i})^2$ мм ²	m_i г	Δm_i г	$(\Delta m_i)^2$ г ²	ρ г/см ³
1																—
2																—
3																—
Среднее																

Таблица 1.4

№ п/п	L_i мм	ΔL_i мм	$(\Delta L_i)^2$ мм ²	b_i мм	Δb_i мм	$(\Delta b_i)^2$ мм ²	h_i мм	Δh_i мм	$(\Delta h_i)^2$ мм ²	m_i г	Δm_i г	$(\Delta m_i)^2$ г ²	ρ г/см ³
1													—
2													—
3													—
Среднее													

3. Трехкратным (меняя чашки весов) взвешиванием определить массу цилиндра с помощью технических весов.

4. Вычислить среднюю плотность материала цилиндра по формуле

$$\bar{\rho} = \frac{4\bar{m}}{\pi(\bar{D}^2\bar{h}_1 + \bar{d}^2\bar{h}_2)}, \quad (1.22)$$

где $\bar{m}, \bar{d}, \bar{D}, \bar{h}_1, \bar{h}_2$ – средние значения величин.

Плотность находить в г/см^3 и кг/м^3 .

5. Вычислить доверительную и относительную погрешность измерений по формулам (1.15) и (1.17).

III. Тело - прямоугольная пластина (рис.1.11).

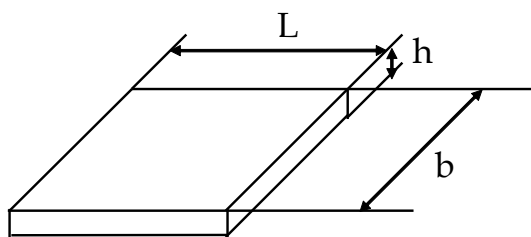


Рис. 1.11

Плотность ρ вещества пластины определяется по формуле

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{L \cdot b \cdot h}. \quad (1.23)$$

Для определения размеров прямоугольной пластины пользуются штангенциркулем и микрометром.

1. Измерить длину L и ширину b пластины штангенциркулем (в разных сечениях).

2. Проверить исправность микрометра. Для этого надо конец 4 микрометрического винта совместить с упором 3 (рис.1.6) и выяснить, совпадает ли нулевое деление основной неподвижной шкалы с нулевым делением круговой шкалы.

3. Определить цену деления микрометрического винта и круговой шкалы.

4. Измерить микрометром толщину h пластины.

5. Результаты всех измерений занести в табл.1.4.

6. Каждое измерение повторить не менее трех раз.

7. Пользуясь техническими весами, определить массу пластинки (трехкратным взвешиванием).

8. Вычислить среднюю плотность материала пластины как

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{\bar{L} \cdot \bar{b} \cdot \bar{h}}, \quad (1.24)$$

где $\bar{m}, \bar{L}, \bar{b}, \bar{h}$ – средние значения величин.

Плотность находят в г/см^3 и кг/м^3 .

9. Вычислить доверительную и относительную погрешность измерения по формулам (1.15) и (1.17).

Контрольные вопросы

1. Как измерить линейные размеры с помощью штангенциркуля и микрометра?
2. Что такое прямые и косвенные измерения?
3. Дать определение грубой, систематической и случайной погрешностям измерений.
4. Что такое результат измерения? Как определяется абсолютная погрешность отдельного результата измерений?
5. Когда применяется распределение Стьюдента? Как с его помощью определить доверительную границу погрешности прямого измерения?
6. Как изменяется доверительная граница погрешности при изменении числа измерений и доверительной вероятности?
7. Как рассчитать доверительную границу случайной погрешности косвенного измерения?
8. Что называется относительной погрешностью измерения?
9. Как измеряется масса тела в работе?
10. Что такое плотность вещества? Какова ее размерность?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Измерение ускорения свободного падения с помощью математического и обратного (физического) маятников

Цель работы: изучение колебаний физического и математического маятников и измерение ускорения свободного падения с помощью математической и материальной модели.

Краткая теория и методика измерений

Маятники в этой работе - это тела, колеблющиеся под действием сил тяготения.

Математическим маятником является материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити длиной L (см. рис.1.12). Будем считать, что сопротивление среды пренебрежимо мало. Если математический маятник отклонить на малую величину x , то возникает сила, направленная к положению равновесия маятника, величина которой

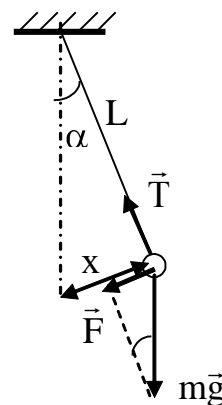


Рис. 1.12

$$F = mg \sin \alpha, \quad (1.25)$$

где α - угол отклонения нити маятника от вертикали.

При малых углах ($\alpha < 10^\circ$) можно считать $\alpha \approx \sin \alpha$. Тогда выражение (1.25) принимает вид

$$F = mg\alpha = mg \frac{x}{L}.$$

Т.е. на груз маятника будет действовать сила, прямо пропорциональная смещению x и направленная к положению равновесия маятника. Следовательно, в этом случае происходят гармонические колебания, описываемые уравнениями (1.1) и (1.2).

Циклическая частота этих колебаний может быть определена по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}. \quad (1.26)$$

Число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется *частотой* колебаний

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.27)$$

Частота колебаний f связана с циклической частотой ω_0 формулой

$$\omega_0 = 2\pi f. \quad (1.28)$$

Время, за которое происходит одно колебание, называется *периодом* T

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (1.29)$$

Соответственно, период колебаний математического маятника равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (1.30)$$

Формулу (1.30) можно записать в виде:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} L.$$

Полученная линейная зависимость T^2 от L может быть проверена экспериментально. Наклон прямой к оси абсцисс позволяет определить g :

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2}{T^2/L}. \quad (1.31)$$

Физическим маятником является любое твердое тело, способное совершать колебания вокруг горизонтальной оси, не проходящей через

его центр масс. Каждому физическому маятнику можно сопоставить математический маятник, колеблющийся с той же частотой. Длину такого математического маятника называют приведенной длиной физического маятника $L_{пр}$.

Таким образом, *приведенная длина физического маятника* - это длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника. Для всякого тела, рассматриваемого как физический маятник, можно указать две такие точки, именуемые центрами качания, что период малых колебаний при качании вокруг осей, проходящих через эти точки одинаков, а расстояние между ними равно приведенной длине физического маятника. На этом свойстве оборотного маятника основано определение ускорения свободного падения.

Оборотным будет такой маятник, у которого имеются две параллельные друг другу, закрепленные опорные призмы, за которые он может поочередно подвешиваться. Вдоль маятника могут перемещаться и закрепляться на нем тяжелые грузы. Перемещением грузов или опорных призм добиваются того, чтобы при подвешивании маятника за любую из призм период колебаний был одинаков. Тогда расстояние между опорными ребрами призм будет равно $L_{пр}$.

Измерив период колебаний маятника, и зная $L_{пр}$, можно из формулы

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L_{пр}}{g}} \quad (1.32)$$

найти ускорение свободного падения g .

Экспериментальная установка

Для измерения ускорения свободного падения предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.1.13.

Установка состоит из математического и оборотного маятников. Математический маятник представляет собой металлический шарик 5 на бифилярном подвесе 4. Длина подвеса может изменяться в пределах (0,1 – 0,5) м вращением винта 3 и измеряется с помощью линейки 10, укрепленной на стойке 9.

Оборотный маятник состоит из металлического стержня 14, на котором крепятся две способные перемещаться опорные призмы 13, обращенные ножами навстречу друг другу, и два тяжелых чечевицеобразных груза 12, перемещение которых существенно изменяет распределение масс.

Установка снабжена фотодатчиком 11, фиксирующим прохождение маятником положения равновесия. Сигнал с датчика подается на миллисекундомер 7 и счетчик числа полных колебаний 8.

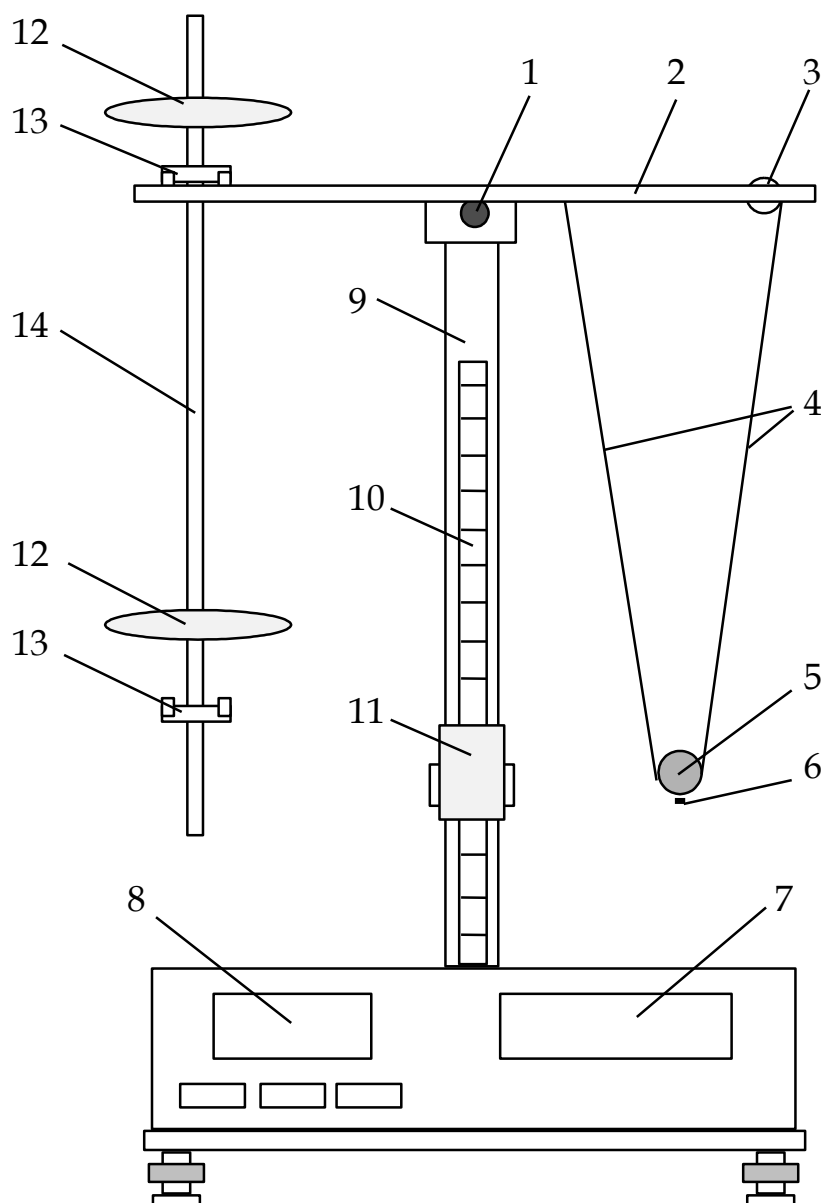


Рис. 1.13

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Проверка зависимости периода колебаний от длины математического маятника и определение ускорения свободного падения.

1. Освободив винт 1, повернуть верхнюю планку так, чтобы математический маятник оказался над фотодатчиком перед линейкой 10. Винт 1 закрепить.

2. Вращением винта 3 установить длину маятника $L = 30$ см по линейке 10 на стойке 9 прибора.

3. Отпустив винт, поднять фотодатчик до уровня центра шарика. Центр шарика расположить на оси фотодатчика. Винт закрепить.

4. Установочными винтами 3 и 6 отрегулировать положение шарика так, чтобы он проходил между оптическими элементами фотодатчика.

5. Подключить установку к сети 220 В. Нажать кнопку «Сеть».

6. Отклонить шарик на небольшой угол ($5 - 10^\circ$) и отпустить.

7. Нажать кнопку «Сброс» на панели секундомера и отпустить ее. После $n = (10 - 15)$ колебаний нажать кнопку «Стоп». Показания миллисекундомера занести в табл.1.5.

Таблица 1.5

№ п.п	L м	n –	t с	T = t/n с	T _{ср} с	T _{ср} ² с ²
1	0.3					
2						
3						
1	0.35					
2						
3						
1	0.4					
2						
3						
1	0.45					
2						
3						
1	0.5					
2						
3						

8. Повторив п.п 6, 7 еще два раза, найти среднее значение периода.

9. Повторить п.п 2...8 для длин маятника (35, 40, 45 и 50) см.

10. Выключить установку, нажав кнопку «Сеть».

11. По полученным данным построить график зависимости $T^2 = f(L)$ (экспериментальные точки и прямая линия).

12. С использованием графика (прямой линии) определить ускорение свободного падения по формуле (1.31).

Упражнение 2.

Определение ускорения свободного падения с помощью
оборотного маятника.

1. Освободив винт 1 (рис.1.13), повернуть верхнюю планку 2 таким образом, чтобы нижняя часть оси оборотного маятника проходила через прорез фотодатчика 11.

2. Включить установку, нажав кнопку «Сеть».

3. При положении грузов А и В согласно рис.1.14а и при произвольном положении призмы 1 (ближе к краю) измерить период малых колебаний $(5-10)^\circ$. Для этого необходимо подвесить маятник за призму 1, слегка качнуть его, нажать кнопку «Сброс» и отпустить ее. После 10 – 20 колебаний нажать кнопку «Стоп». Записать время t и число колебаний n . Определить период $T_1 = t/n$.

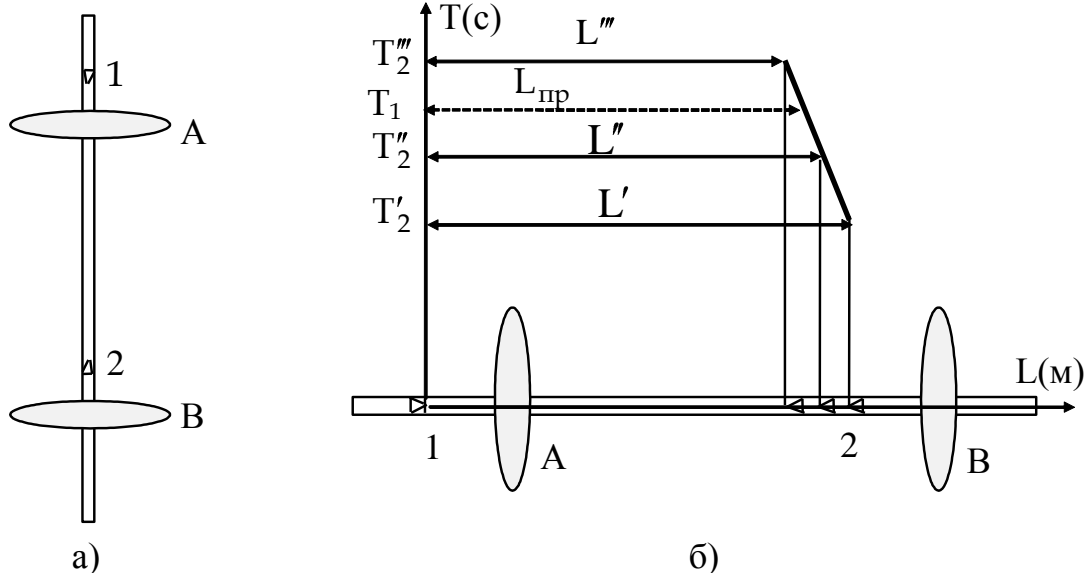


Рис. 1.14

4. Не изменяя положения грузов А и В, перевернуть маятник, подвесив его за призму 2, и аналогичным образом измерить период T_2' при положении призмы 2 вблизи груза В. Число колебаний при этом может быть не очень велико. Убедиться, что теперь период меньше, чем T_1 .

5. Измерить расстояние между ножами призм L' .

6. Снять маятник со штатива и незначительно (не более чем на 1 см) переместить призму 2 ближе к центру стержня. Подвесить маятник за призму 2 и измерить период T_2'' и расстояние L'' .

7. Перемещая призму 2, найти два таких положения призмы, когда период колебаний несколько больше и несколько меньше периода T_1 , и измерить эти периоды с достаточно высокой точностью ((10 – 20) колебаний). Измерить соответствующие расстояния между ножами призм.

8. Выключить установку, нажав на кнопку «Сеть».

9. Построить график зависимости периода колебаний T от расстояния между ножами опорных призм L и по графику определить $L_{пр}$ (рис.1.14б).

10. Из формулы (1.32) найти ускорение свободного падения:

$$g = \frac{4\pi^2 L_{пр}}{T_1^2}.$$

Контрольные вопросы

1. Что называется математическим маятником?
2. Опишите идеальную модель математического маятника.
3. Что называется циклической частотой, периодом и частотой гармонических колебаний?
4. Что называется физическим маятником?
5. Что такое приведенная длина физического маятника?
6. Опишите методики определения ускорения свободного падения, используемые в работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

Исследование свободных колебаний пружинного маятника

Цель работы: изучение зависимости периода колебаний пружинного маятника от массы тела и жесткости проволоки с помощью математической и материальной модели.

Краткая теория и методика измерений

В данной работе исследуются гармонические колебания пружинного маятника (рис.1.15), состоящего из спиральной легкой пружины, к которой подвешивается груз массой m .

Если вывести груз из положения равновесия, немного растянув пружину, и предоставить ее самой себе, то на груз будет действовать дополнительная упругая (возвращающая) сила пружины, прямо пропорциональная смещению x от положения равновесия и направленная в сторону, противоположную смещению: $F = -kx$ (здесь k – коэффициент жесткости пружины).

Под действием этой силы тело совершает гармонические колебания, описываемые уравнениями (1.1) и (1.2). Циклическая частота этих колебаний может быть определена по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (1.33)$$

Число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется *частотой* колебаний

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.34)$$

Частота колебаний f связана с циклической частотой ω_0 формулой

$$\omega_0 = 2\pi f. \quad (1.35)$$

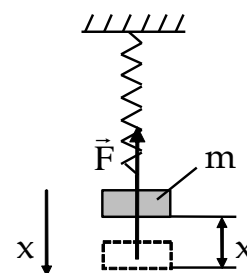


Рис. 1.15

Время, за которое происходит одно колебание, называется *периодом* T

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (1.36)$$

Соответственно, период колебаний пружинного маятника равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1.37)$$

откуда можно получить

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}. \quad (1.38)$$

Целью работы является экспериментальная проверка соотношения (1.38).

Измерив период колебаний для различных значений массы m при $k = \text{const}$, можно получить график зависимости квадрата периода колебаний T^2 от массы m колеблющегося тела. График функции $T^2 = f(m)$ при $k = \text{const}$ в соответствии с (1.38) при гармонических колебаниях должен быть прямой линией, проходящей через начало координат.

Измерив период колебаний для различных значений k при одной и той же массе $m = \text{const}$, можно получить график зависимости квадрата периода колебаний T^2 от $1/k$. График функции $T^2 = f(1/k)$ тоже должен быть прямой линией, проходящей через начало координат.

Экспериментальная установка состоит из подставки, к которой прикреплены пружины 1, 2, 3 разной длины, обладающие различными упругими свойствами. К пружинам прикреплены подвесы, на которые помещают цилиндрические грузы массой $m_{\text{гр}} = 0,05$ кг каждый (масса подвеса также 0,05 кг). Число грузов можно изменять, следовательно, можно изменять колеблющуюся массу и силу, растягивающую пружину.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Проверка зависимости $T^2 = f(m)$ при $k = \text{const}$.

1. Найти опытным путем периоды колебаний грузов различной массы m_1, m_2, m_3 и т.д. на одной и той же пружине. Для этого на подвес выбранной пружины сначала положить один груз массой m , общая масса будет $m_1 = m_0 + m$ (где m_0 - масса подвеса). Пружину осторожно оттянуть вниз на (1...1,5) см и отпустить.

По секундомеру измерить время t , в течение которого совершается n колебаний.

Таблица 1.6

 $k = \text{const}$

№ п.п	$m_1 = \dots$			$m_2 = \dots$			$m_3 = \dots$			$m_4 = \dots$		
	t_1 с	n_1	T_1 с	t_2 с	n_2	T_2 с	t_3 с	n_3	T_3 с	t_4 с	n_4	T_4 с
1												
2												
3												
Средние	$T_{1\text{cp}} = \dots$			$T_{2\text{cp}} = \dots$			$T_{3\text{cp}} = \dots$			$T_{4\text{cp}} = \dots$		
	$T_{1\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{2\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{3\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{4\text{cp}}^2 = \dots$		

2. Подсчитать период колебаний пружины с одним грузом по формуле $T = t/n$. Результаты записать в табл.1.6.

3. Измерения по п.п 1–2 повторить не менее трех раз при различных значениях числа колебаний n . Найти среднее значение периода колебаний T_1 с грузом m_1 как среднее арифметическое из нескольких измерений.

4. Повторить измерения по п.п 1...3, положив на подвес этой же пружины два ($m_2 = m_0 + 2m$), три и четыре груза. Результаты занести в табл.1.6.

5. По результатам измерений построить график, аналогичный показанному на рис.1.16.

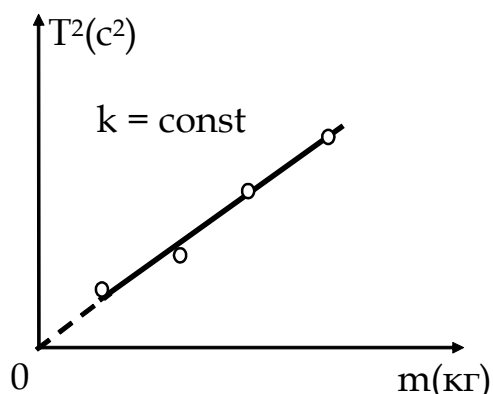


Рис. 1.16

Упражнение 2.

Проверка зависимости $T^2 = f(1/k)$ при $m = \text{const}$.

1. Найти коэффициенты возвращающей силы k . С этой целью по линейке отметить начальное положение N_0 пружины 1 с подвесом (без грузов) (рис.1.17). Положив на подвес добавочный груз m , отметить положение N_1 пружины с массой $m_1 = m + m_0$. Смещение пружины под действием груза m равно $(N_1 - N_0)$. Коэффициент возвращающей силы k'_1 рассчитывается по формуле

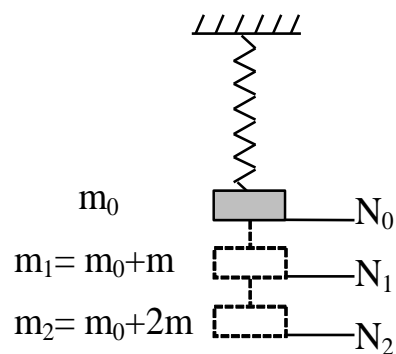


Рис. 1.17

$$k'_1 = \frac{(m_i - m_{i-1})g}{N_i - N_{i-1}} = \frac{mg}{N_i - N_{i-1}}, \quad (1.39)$$

где i - номер груза.

Таблица 1.7

Номер пружины	Номер измерения	$m_i g$ Н	N м	$N_i - N_{i-1}$ м	k Н/м
1	1				
	2				
	3				
	4				
Среднее $k_1 =$					
2	1				
	2				
	3				
	4				
Среднее $k_2 =$					
3	1				
	2				
	3				
	4				
Среднее $k_3 =$					

2. Добавляя постепенно грузы рассчитать по формуле (1.39) значения коэффициента возвращающей силы $k''_1, k'''_1 \dots$ для той же пружины 1. Результаты измерений занести в табл.1.7.

Таблица 1.8

$m = \text{const}$

№ п.п	$\frac{1}{k_1} = \dots$			$\frac{1}{k_2} = \dots$			$\frac{1}{k_3} = \dots$		
	t_1 с	n_1	T_1 с	t_2 с	n_2	T_2 с	t_3 с	n_3	T_3 с
1									
2									
3									
Средние	$T_{1cp} = \dots$			$T_{2cp} = \dots$			$T_{3cp} = \dots$		
	$T_{1cp}^2 = \dots$			$T_{2cp}^2 = \dots$			$T_{3cp}^2 = \dots$		

3. Найти среднее арифметическое значение k_1 для первой пружины.
4. Измерения по п.п 1...3 повторяют для второй и третьей пружины.
5. Рассчитать средние значения $1/k_1$, $1/k_2$, $1/k_3$ и записать в табл.1.7.
6. На первую пружину положить два (или любое другое число) груза и по секундомеру измерить время t , в течение которого совершается n колебаний.
7. Рассчитать период колебаний первой пружины по формуле $T = t/n$. Результаты записать в табл.1.8.
8. Измерения по п.п 6 – 7 повторить не менее трех раз при различных значениях числа колебаний n . Найти среднее значение периода колебаний T_1 первой пружины как среднее арифметическое из нескольких измерений.
9. Повторить измерения по п.п 6...8 для двух других пружин с теми же грузами. Измерения занести в табл.1.8.
10. По результатам измерений построить график, аналогичный показанному на рис.1.18.

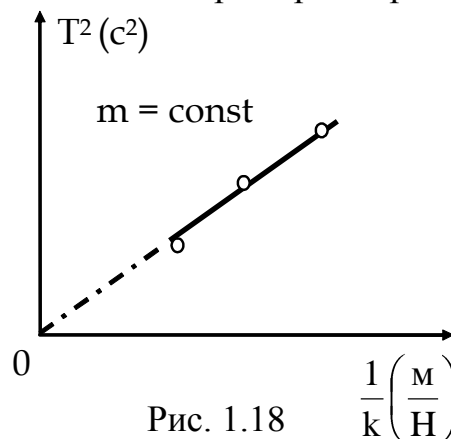


Рис. 1.18

Контрольные вопросы

1. Опишите идеальную модель пружинного маятника.
2. Что называется циклической частотой, периодом и частотой гармонических колебаний?
3. В чем заключается методика измерений в данной работе?
4. Как в работе определяется коэффициент возвращающей силы пружины?
5. От чего зависит период колебаний пружинного маятника?
6. Объясните графики, полученные в данной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

Исследование крутильных колебаний

Цель работы: изучение зависимости периода крутильных колебаний от момента инерции тела и упругих свойств проволоки с помощью математической и материальной модели.

Методика измерений и экспериментальная установка

В данной работе исследуются гармонические колебания крутильного маятника - тела, подвешенного на проволоке, относительно оси симметрии, совпадающей с проволокой (рис.1.19).

При повороте тела от положения равновесия в горизонтальной плоскости на небольшой угол φ , в проволоке возникает возвращающий момент упругих сил, прямо пропорциональный углу закручивания:

$$M = -c\varphi, \quad (1.40)$$

где c - коэффициент возвращающего момента, определяемый свойствами проволоки.

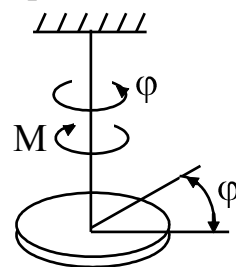


Рис.1.19

Можно показать, что в этом случае тело будет совершать гармонические крутильные колебания. При крутильных колебаниях в уравнениях колебаний (1.1) и (1.2) вместо величины x в качестве переменной используется угол поворота (угловое смещение тела) φ .

Дифференциальное уравнение гармонических крутильных колебаний, подобное уравнению (1.1), будет иметь вид:

$$\varphi'' + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (1.41)$$

Решением уравнения (1.41) является функция, аналогичная (1.1):

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega_0 t + \alpha) \quad (1.42)$$

где φ_0 - амплитуда колебаний.

Циклическая частота этих колебаний определяется по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{J}}; \quad (1.43)$$

где J – момент инерции, величина, характеризующая свойства тела при его вращении. Эта физическая величина является мерой инерционных свойств тела при вращательном движении подобно тому, как масса тела – при поступательном движении.

Число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется *частотой* колебаний

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.44)$$

Частота колебаний f связана с циклической частотой ω_0 формулой

$$\omega_0 = 2\pi f. \quad (1.45)$$

Время, за которое происходит одно колебание, называется *периодом* T

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (1.46)$$

Соответственно, период крутильных колебаний равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{c}}, \quad (1.47)$$

откуда можно получить

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{J}{c}. \quad (1.48)$$

Целью работы является экспериментальная проверка соотношения (1.48). Экспериментальная установка состоит из перекладины (см. рис.1.20), к которой прикреплены три проволоки разной длины L_1, L_2, L_3 , обладающие различными упругими свойствами. К проволокам прикреплены подвесы 1, 2, 3, на которые помещают одинаковые цилиндрические грузы с известным значением момента инерции. Число грузов на каждой проволоке можно изменять, следовательно, можно изменять и момент инерции колеблющейся системы. Момент инерции подвеса $J_{\text{п}}$ для данной установки мал и при расчетах им можно пренебречь.

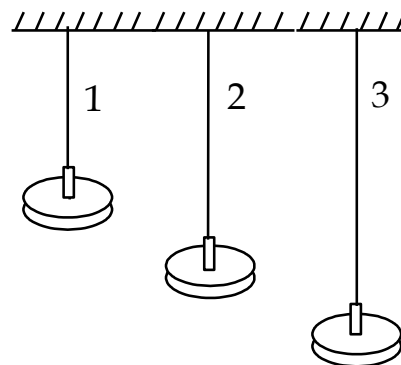


Рис. 1.20

Измерив период колебаний крутильного маятника для различных значений момента инерции J грузов при $c = \text{const}$, можно получить график зависимости квадрата периода колебаний T^2 от момента инерции J . График функции $T^2 = f(J)$ в соответствии (1.48) должен быть прямой линией, проходящей через начало координат.

Измерив период колебаний для различных значений c и одного и того же тела ($J = \text{const}$), можно получить график зависимости $T^2 = f(1/c)$. График этой функции также должен быть прямой линией, проходящей через начало координат.

Коэффициент возвращающего момента определяется по формуле:

$$c = \frac{\pi G}{2} \cdot \frac{r^4}{L}, \quad (1.49)$$

где G - модуль сдвига, характеризующий упругие свойства материала проволоки, r - радиус проволоки; L - длина проволоки.

Значения модуля сдвига G , радиуса проволоки r , а также момента инерции груза J и приведены в таблице на подставке установки.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Проверка зависимости $T^2 = f(J)$ при $c = \text{const}$.

1. Найти опытным путем периоды колебаний одного, двух, трех и т.д. грузов на подвесе одной и той же проволоки средней длины. Для этого на подвес сначала поместить один груз с моментом инерции J , суммарный момент инерции системы будет $J_1 = J$. Подвес с грузом осторожно повернуть в горизонтальной плоскости на небольшой угол (не допуская

раскачивания груза) и отпустить. По секундомеру замерить время t , в течение которого совершается n полных крутильных колебаний.

2. Подсчитать период колебаний проволоки с одним грузом по формуле $T = t/n$.

3. Измерения по п.п 1 - 2 повторить не менее трех раз при различных значениях числа колебаний n . Найти среднее значение периода колебаний T_1 с одним грузом как среднее арифметическое из трех измерений. Результаты занести в табл.1.9.

Таблица 1.9

 $c = \text{const}$

	$J_1 = \dots$			$J_2 = \dots$			$J_3 = \dots$			$J_4 = \dots$		
№ п.п	t_1 с	n_1	T_1 с	t_2 с	n_2	T_2 с	t_3 с	n_3	T_3 с	t_4 с	n_4	T_4 с
1												
2												
3												
Средние	$T_{1\text{cp}} = \dots$			$T_{2\text{cp}} = \dots$			$T_{3\text{cp}} = \dots$			$T_{4\text{cp}} = \dots$		
	$T_{1\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{2\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{3\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{4\text{cp}}^2 = \dots$		

4. Повторить измерения по п.п 1...3, помещая на подвес этой же проволоки два ($J_2 = 2J$), три и четыре груза.

5. По результатам измерений построить график, аналогичный показанному на рис.1.21.

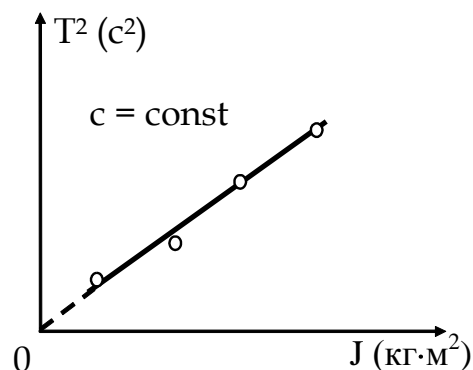


Рис.1.21

Упражнение 2.

Проверка зависимости $T^2 = f(1/c)$ при $J = \text{const}$.

1. Рассчитать коэффициенты возвращающего момента c для каждой проволоки по формуле (1.49) и найти величины $\frac{1}{c_1}$, $\frac{1}{c_2}$, $\frac{1}{c_3}$.

Результаты расчетов записать в табл. 1.10.

2. На первую проволоку положить груз (или несколько) и по секундомеру измерить время t , в течение которого совершается n колебаний.

3. Рассчитать период колебаний первой проволоки по формуле $T_1 = t/n$. Результаты записать в табл.1.10.

Таблица 1.10

 $J = \text{const}$

	$\frac{1}{c_1} = \dots$			$\frac{1}{c_2} = \dots$			$\frac{1}{c_3} = \dots$		
№ п.п	t_1 с	n_1	T_1 с	t_2 с	n_2	T_2 с	t_3 с	n_3	T_3 с
1									
2									
3									
Средние	$T_{1\text{cp}} = \dots$ $T_{1\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{2\text{cp}} = \dots$ $T_{2\text{cp}}^2 = \dots$			$T_{3\text{cp}} = \dots$ $T_{3\text{cp}}^2 = \dots$		

4. Измерения по п.п 2 – 3 повторить не менее трех раз при различных значениях числа колебаний n . Найти среднее значение периода колебаний T_1 первой проволоки, как среднее арифметическое из нескольких измерений.

5. Повторить измерения по п.п 2...4 для двух других проволок с тем же грузом. Измерения занести в табл.1.10.

6. По результатам измерений построить график, аналогичный показанному на рис.1.22.

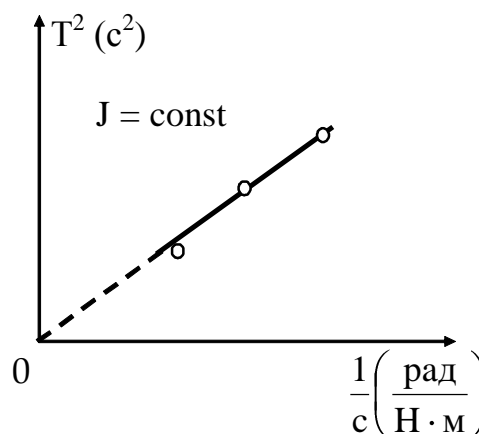


Рис. 1.22

Контрольные вопросы

1. Опишите идеальную модель крутильных колебаний.
2. Как в работе определяется коэффициент возвращающего момента?
3. Что называется циклической частотой, периодом и частотой гармонических колебаний?
4. От чего зависит период крутильных колебаний?
5. Опишите методику измерений, используемую в данной работе.
6. Объясните графики, полученные в данной работе.

РАЗДЕЛ 2

Образ природы в классическом естествознании: корпускулярная концепция

2.1. Модель корпускулы и ньютоновская механика

В истории науки сложились две общие концепции описания природы: *корпускулярная и континуальная*.

В **корпускулярной концепции** центральное место занимает модель корпускулы (частицы). Фундаментальная роль этой модели обусловлена тем, что она оказалась универсальной. Этой модели может соответствовать поведение и микро-, и макро-, и мегаобъектов.

Принципиально важными в модели корпускулы являются два допущения:

1. Любой реальный объект при определенных условиях может быть заменен моделью (частицей), при этом от внутренних свойств и внутренних движений этого объекта можно абстрагироваться.

2. Использование модели корпускулы допускает возможность обособить моделируемый объект от его окружения. В этом случае существует два варианта:

а) влиянием окружения пренебрегают полностью – тогда речь идет о *модели свободной частицы*;

б) концепция контролируемого воздействия – внешнее воздействие существует в виде результирующей силы, которая полностью описывает воздействие окружения на объект – *модель несвободной частицы*.

На основе экспериментального исследования механических процессов и их математического описания с помощью корпускулярной модели была создана полноценная научная теория: теория механических процессов – **НЬЮТОНОВСКАЯ МЕХАНИКА**.

В ньютоновской механике физические события (движение тел в пространстве и времени) описываются тремя законами Ньютона.

Пространство и время обладают объективной реальностью, **абсолютны и независимы друг от друга**.

Вводится понятие *системы отсчета* - совокупности системы координат* и синхронизированных часов.

При создании классической механики Ньютон применил понятие «абсолютного» времени, которое течет всегда и везде равномерно.

Рассмотрим подробнее модель механического процесса.

Положение частицы характеризуется *радиус-вектором* (или тремя координатами)

* например, прямолинейные декартовы координаты: $x = x(t)$; $y = y(t)$; $z = z(t)$.

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (2.1)$$

Интенсивность и направление движения задается *вектором скорости*

$$\vec{v} = \vec{r}' = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}, \quad (2.2)$$

а изменение скорости – *вектором ускорения*

$$\vec{a} = \vec{v}' = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k}. \quad (2.3)$$

Контролируемое воздействие на частицу задается *вектором силы*

$$\vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j} + F_z\vec{k}. \quad (2.4)$$

Инерционные свойства материальной точки характеризуются мерой инертности тела – его *массой* m .

Следует заметить, что фундаментальной характеристикой движения является *импульс* \vec{p} . В ньютоновской механике импульс

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.5)$$

В классической механике кроме системы отсчета необходимо задать две **независимые характеристики частицы: скорость (или импульс) и координаты (или радиус-вектор)**. Они полностью описывают состояние частицы в некоторый момент времени. Изменение состояния происходит в соответствии с законами Ньютона.

Закон инерции (1 закон Ньютона) определяет неизменность импульса в модели свободной частицы: *всякая материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее изменить это состояние*.

Основной закон динамики (2 закон Ньютона) описывает изменение импульса в модели несвободной частицы:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \quad (2.6)$$

где под \vec{F} понимается равнодействующая всех сил, приложенных к телу.

Поскольку $d\vec{v}/dt = \vec{v}' = \vec{a}'$, то с учетом (2.5) для случая $m = \text{const}$, второй закон Ньютона можно сформулировать следующим образом: *ускорение, приобретаемое материальной точкой, прямо пропорционально вызывающей его силе и обратно пропорционально массе материальной точки*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.7)$$

3 закон Ньютона: *силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, равны по величине и противоположны по направлению*. Третий закон позволяет осуществить переход к динамике системы материальных точек. Заметим, что твердое тело можно представить, как систему жестко скрепленных материальных точек.

Изучению законов Ньютона посвящена лабораторная работа № 25(ф).

Уравнения (2.1) – (2.6) представляют собой замкнутую систему уравнений, из которой можно определить состояние частицы в любой момент времени.

Все закономерности, которые, подобно законам механики, позволяют по начальным состояниям и известным взаимодействиям однозначно вычислять будущие состояния системы, именуется закономерностями динамического типа.

Из однозначного характера закономерностей динамического типа вытекает представление о жесткой предопределенности (*детерминированности*) событий в природе. *Детерминизм* утверждает, что наличие случайностей обусловлено лишь невозможностью учета всех факторов*.

Как мы увидим далее, это не так, случайность играет важнейшую роль в природе.

2.2. Свойства пространства - времени и законы сохранения

Экспериментально установлено, что в природе наиболее вероятны не любые процессы и движения, а только те, которые не нарушают так называемых **законов сохранения**.

Выяснилось, что законы сохранения тесно связаны с фундаментальными свойствами симметрии в природе.

Симметрия – инвариантность структуры, свойств, формы материального объекта относительно его преобразований (сдвигов, вращений, и т.д.).

Из принципа инвариантности **относительно сдвигов** следует симметрия, называемая *однородностью*. Из принципа инвариантности **относительно поворота** – симметрия, называемая *изотропностью*.

Однородность и изотропность наблюдаемого **пространства** являются его специфическими свойствами. Однородность пространства означает отсутствие в нем каких-либо выделенных точек, а изотропность – равноправность всех возможных направлений.

В отличие от пространства **время** обладает только свойством однородности, заключающимся в равноправии всех его моментов.

Связь между свойствами пространства – времени и законами сохранения установила в 1918 году немецкий математик Эмми Нётер. Она сформулировала и доказала теорему, названную ее именем:

Из однородности пространства и времени следуют законы сохранения, соответственно, импульса и энергии, а из изотропности пространства – закон сохранения момента импульса.

* Такое представление было впервые четко сформулировано Лапласом и получило название *классического лапласовского детерминизма*.

Симметрия и законы сохранения не вытекают одно из другого, а являются равноправными и взаимосвязанными проявлениями фундаментальных свойств материи. Симметрия обладает признаком всеобщности, она пронизывает все сущее, поэтому и связанные с ней законы сохранения **фундаментальны**. Рассмотрим подробнее.

Однородность пространства заключается в том, что при параллельном переносе в пространстве изолированной* системы тел как целого ее физические свойства и законы движения не изменяются. Это определяет возможность произвольного выбора положения начала координат инерциальной системы отсчета.

Из свойства однородности пространства следует **закон сохранения импульса**: импульс изолированной системы тел сохраняется.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const.}, \quad (2.8)$$

где m_i , \vec{v}_i - масса и скорость i -го тела системы.

Однородность времени означает инвариантность физических законов относительно выбора начала отсчета времени.

Из однородности времени следует **закон сохранения энергии**: суммарная энергия изолированной системы не изменяется

$$E_{\text{системы}} = \text{const.} \quad (2.9)$$

Энергия есть общая мера различных форм движения и взаимодействия всех видов материи (энергия механическая, тепловая, электрическая...). При эволюции системы могут изменяться доли энергий различного вида, что объясняется переходом энергии из одного вида в другой.

Использование закона сохранения энергии в математической модели удара двух тел будет рассмотрено в лабораторной работе № 5а.

Еще одно важное свойство симметрии пространства – его изотропность. Изотропность пространства означает инвариантность физических законов относительно выбора направления осей координат системы отсчета, т.е. относительно ее поворота в пространстве на любой угол.

Вращательное движение механической системы описывается с помощью момента импульса (рис.2.1)

$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}], \quad (2.10)$$

модуль которого

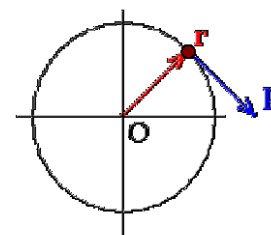


Рис. 2.1

* Изолированной называется система, на тела которой не действуют внешние силы или они скомпенсированы.

$$L = r \cdot p \cdot \sin \alpha . \quad (2.11)$$

В квадратных скобках стоит векторное произведение радиус-вектора на импульс материальной точки.

Из изотропности пространства следует **закон сохранения момента импульса**: момент импульса изолированной системы сохраняется

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^n \vec{L}_i = \text{const} , \quad (2.12)$$

где \vec{L}_i - момент импульса i -ого тела системы.

До сих пор не обнаружено ни одного нарушения трех фундаментальных законов сохранения. Они являются инструментами теоретического исследования различных процессов.

Вопросы по разделу 2

1. Опишите корпускулярную модель частицы.
2. Какими свойствами обладают пространство и время в ньютоновской механике?
3. В чем заключается, согласно Ньютону, модель механического процесса?
4. Сформулируйте три закона Ньютона.
5. Дайте определение термину «детерминизм».
6. Что называется симметрией? Какими видами симметрии обладают пространство и время?
7. Сформулируйте теорему Нётер.
8. В чем заключается закон сохранения импульса?
9. В чем заключается закон сохранения энергии?
10. Что такое момент импульса? В чем заключается закон сохранения момента импульса?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25(Ф)

Определение коэффициента сопротивления жидкой среды движению шарика

Цель работы: определение зависимости коэффициента сопротивления движению тела в жидкости от размеров тела.

Методика измерений

На твердый шарик, опускающийся в вязкой жидкости, действуют три силы (рис.2.2): сила тяжести

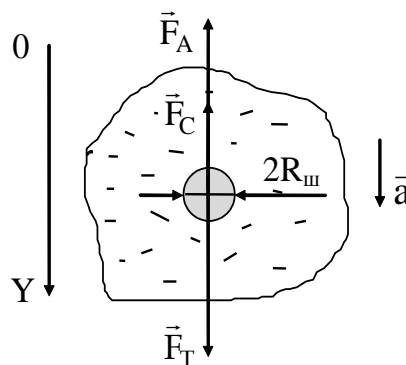


Рис. 2.2

$$\vec{F}_T = m\vec{g} = \rho_{\text{ш}} V\vec{g}, \quad (2.13)$$

выталкивающая сила Архимеда F_A и сила сопротивления движению шарика F_C , обусловленная силами внутреннего трения жидкости.

Силой Архимеда F_A называется сила, действующая на тело, погруженное в жидкость плотностью ρ_0 , со стороны жидкости

$$\vec{F}_A = -\rho_0 V\vec{g}, \quad (2.14)$$

где V - объем погруженного в жидкость тела, g - ускорение свободного падения.

Сила Архимеда направлена вертикально вверх и приложена к центру тяжести погруженной части тела

Сила сопротивления F_C возникает при относительном движении твердого тела и вязкой среды (жидкость, газ) При малых скоростях движения сила сопротивления пропорциональна скорости тела и направлена в сторону, противоположную вектору скорости тела:

$$\vec{F}_C = -r\vec{v}. \quad (2.15)$$

Коэффициент пропорциональности r (коэффициент сопротивления среды) зависит от формы, поперечных размеров тела и свойств среды, в которой оно перемещается. Коэффициент сопротивления r численно равен силе сопротивления при единичной скорости движения. Размерность r :

$$[r] = \frac{[F]}{[v]} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Уравнение движения шарика радиусом $R_{\text{ш}}$ в жидкости (второй закон Ньютона (2.6)), записанный в проекции на ось OY (рис.2.2), имеет вид:

$$ma = \frac{4}{3}\pi R_{\text{ш}}^3 \rho_{\text{ш}} g - \frac{4}{3}\pi R_{\text{ш}}^3 \rho_0 g - rv. \quad (2.16)$$

Здесь $\rho_{\text{ш}}$ - плотность вещества шарика, ρ_0 - плотность жидкости.

На начальном участке шарик падает с ускорением и скорость его увеличивается. При этом сила сопротивления возрастает. После достижения некоторой скорости v_0 , при которой сумма всех действующих на шарик сил становится равной нулю, шарик будет двигаться с постоянной скоростью. Такое движение шарика называется установившимся. В этом случае уравнение (2.15) принимает вид

$$\frac{4}{3}\pi R_{\text{ш}}^3 g(\rho_{\text{ш}} - \rho_0) - rv_0 = 0. \quad (2.17)$$

Решая уравнение (2.16) относительно коэффициента сопротивления r , получаем

$$r = \frac{4\pi R_{\text{ш}}^3 g (\rho_{\text{ш}} - \rho_0)}{3v_0}. \quad (2.18)$$

Следовательно, для определения коэффициента сопротивления движению шарика в жидкости необходимо знать размеры шарика, плотности материала шарика и жидкости, а также скорость падения шарика.

Экспериментальная установка

В работе в качестве сосуда, в котором находится жидкость, используется стеклянный цилиндр (рис.2.3).

Снаружи цилиндра укреплены кольцевые горизонтальные метки 1 и 2, расположенные одна от другой на расстоянии L (верхняя метка должна быть ниже уровня жидкости на (5...8) см). Цилиндр укреплен на подставке, имеющей винты и отвес, предназначенные для установки вертикальности цилиндра. Время падения шарика в жидкости определяется с помощью секундомера. Плотности материала шарика и жидкости приведены на подставке.

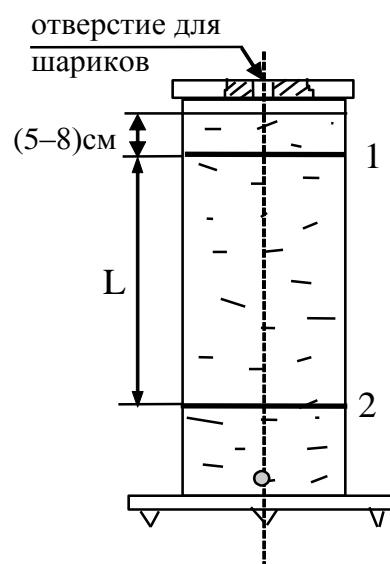


Рис. 2.3

Порядок выполнения работы

1. Установить метки 1 и 2 на цилиндре и измерить расстояние между ними по линейке (глаз наблюдателя при отсчете положения меток должен находиться на одной горизонтали с меткой).

2. Измерить диаметр d каждого шарика при помощи микрометра (или данные сообщает лаборант). Обычно студенты получают три пары шариков разных диаметров. Определить радиус шарика $R_{\text{ш}} = d/2$.

3. Опустить шарик в жидкость как можно ближе к оси цилиндра и с помощью секундомера измерить время падения шарика между метками 1 и 2. Опыт с шариком одного и того же диаметра повторить два раза. Измерения записать в табл.2.1.

4. Измерения по п.3 повторить с шариками другого диаметра (еще два-три размера).

5. По формуле $v_0 = L/t$ рассчитать скорость установившегося движения каждого шарика.

6. Вычислить по формуле (2.18) значение коэффициента сопротивления для каждого опыта и среднее значение \bar{r} для каждого размера шарика.

7. Построить график зависимости среднего коэффициента сопротивления от радиуса шарика $\bar{r} = f(R_{ш})$.

Таблица 2.1

№ п.п	d м	$R_{ш}$ м	$\rho_{ш}$ кг/м ³	ρ_0 кг/м ³	L м	t с	v_0 м/с	r кг/с
1								
2								
3								
среднее								
1								
2								
3								
среднее								
1								
2								
3								
среднее								

Контрольные вопросы

1. Что называется силой Архимеда?
2. От чего зависит сила сопротивления движению тела в жидкости (газе)?
3. Опишите методику измерения коэффициента сопротивления, используемую в данной работе.
4. Запишите уравнения движения шарика на начальном и основном участках.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5А

Изучение неупругого удара шаров

Цель работы: Изучение закона сохранения энергии и определение потерь энергии на деформацию при неупругом ударе.

Методика измерений

Рассмотрим применение закона сохранения энергии (2.8) для случая соударения двух тел (рис.2.4). Будем рассматривать соударение двух неупругих шаров, движущихся вдоль прямой, соединяющей их центры. Такой удар называется центральным.

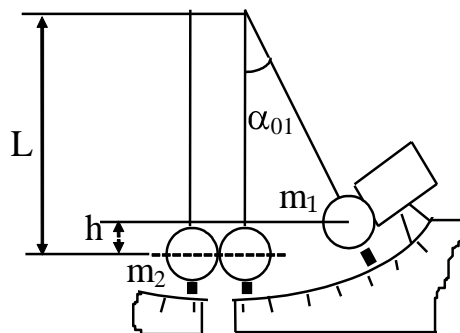


Рис. 2.4

При ударе шары деформируются. Часть кинетической энергии ($K = mv^2/2$), которой они обладали, переходит в энергию деформации. Запишем закон сохранения энергии для положений тел непосредственно перед ударом и после удара

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} + \Delta E \quad (2.19)$$

Здесь ΔE - энергия деформации.

Из уравнения (2.19) следует, что энергия деформации соударяющихся тел равна изменению их кинетической энергии:

$$\begin{aligned} \Delta E &= K_{\text{нач.}} - K_{\text{конеч.}}; \\ \Delta E &= \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Если второе тело до удара было неподвижно ($v_2 = 0$), то получаем

$$\Delta E = \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2}. \quad (2.21)$$

Из соотношения (2.21) следует, что при $v_2 = 0$ доля энергии системы, потерянной при неупругой деформации запишется:

$$\delta = \frac{\Delta E}{K_1} = 1 - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{m_1 v_1^2}. \quad (2.22)$$

В работе два шара из неупругого материала (пластилина) с массами m_1 и m_2 подвешены на нитях длиной L (рис.2.4). Если шар 1 отклонить на угол α_{01} от его первоначального положения и отпустить, то к моменту соударения с неподвижным шаром 2 в нижней точке он будет иметь скорость v_1 .

Значение v_1 может быть рассчитано из закона сохранения энергии, записанного для двух положений первого шара – в отклоненном состоянии и непосредственно перед ударом. В этом случае потенциальная энергия шара в поле силы тяжести ($U = mgh$) полностью переходит в его кинетическую энергию:

$$m_1 gh = \frac{m_1 v_1^2}{2}; \quad v_1 = \sqrt{2gh},$$

где h - высота подъема центра масс шара m_1 при его отклонении на угол α_{01} . Из рис.2.4 видно

$$h = L - L \cos \alpha_{01} = 2L \sin^2 \frac{\alpha_{01}}{2}.$$

Следовательно, скорость первого шара до удара

$$v_1 = 2 \cdot \sqrt{gL} \sin \frac{\alpha_{01}}{2}. \quad (2.23)$$

Аналогично можно выразить скорость шаров после удара

$$v = 2 \cdot \sqrt{gL} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2.24)$$

где v , α - начальная скорость и угол отклонения шаров после удара.

Из соотношений (2.21) - (2.24) можно выразить энергию, затраченную на деформацию при неупругом ударе, через углы отклонения шаров:

$$\Delta E = 2m_1gL \left(\sin^2 \frac{\alpha_{01}}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right) - 2m_2gL \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (2.25)$$

При $m_1 = m_2 = m$ получаем

$$\Delta E = 2mgL \left(\sin^2 \frac{\alpha_{01}}{2} - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right). \quad (2.26)$$

Доля энергии системы, потерянной при неупругой деформации, согласно (2.22):

$$\delta = 1 - 2 \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha_{01}}{2}}. \quad (2.27)$$

Экспериментальная установка

Общий вид экспериментальной установки изображен на рис.2.5.

Она состоит из основания 1 с регулируемыми опорами 2, двух маятников 3 и 4 с механизмом изменения межцентрового расстояния 5, двух шкал 6, 7; электромагнита 11 и микросекундомера 10. Маятники представляют собой шары, подвешенные на нитях к вертикальной стойке. Нити двойные и имеют зажимы для регулировки и фиксации их длины.

Механизм изменения межцентрового расстояния шаров приводится в действие ручкой 8 и фиксируется гайкой 9.

Две шкалы служат для определения начальных углов и углов отклонения шаров от положения равновесия после удара. Шкалы можно перемещать и фиксировать в выбранном положении при помощи винтов. Максимальный отсчет по каждой шкале составляет 15° .

Электромагнит предназначен для удержания подведенного к нему шара в отклоненном положении. Регулировка усилия притяжения шара осуществляется винтом 12. Положение электромагнита должно быть отрегулировано так, чтобы его ось совпадала с центром подведенного к нему шара, и чтобы он правильно ориентировал шар в плоскости шкалы.

С помощью регулировочных опор 2 устанавливается вертикальное положение маятников в соответствии с уровнем. В исходном состоянии шары должны касаться друг друга, стрелки шаров должны находиться в параллельной вертикальной плоскости со шкалами.

Микросекундомер служит для измерения времени соударения шаров (в этой работе не используется).

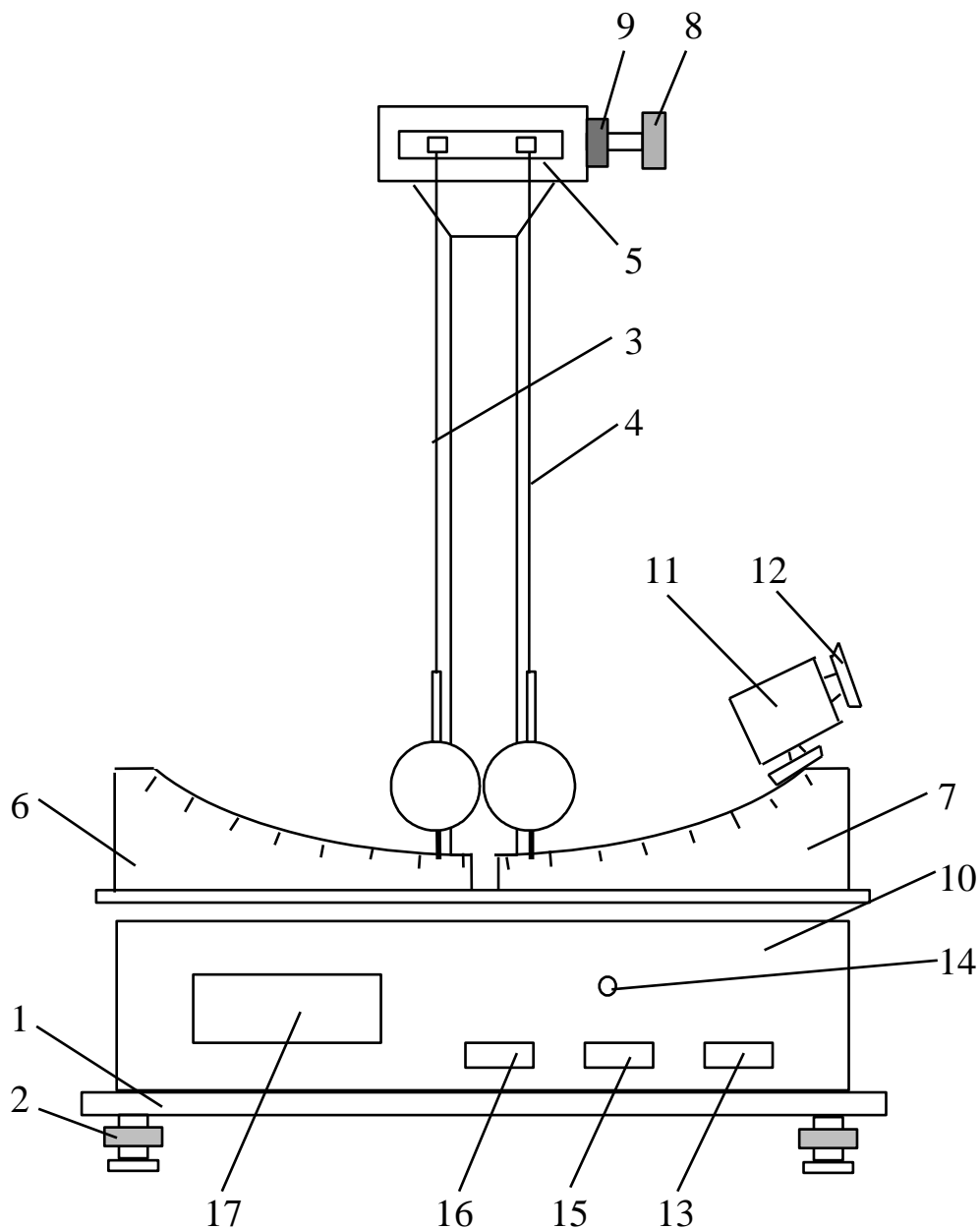


Рис. 2.5

На передней панели установки находятся:
кнопка «Сеть» (13) для включения питания электромагнита (220 В);
кнопка «Пуск» (16) для отключения электромагнита.

Порядок выполнения работы

Перед началом измерения взвесить шары на аналитических весах или узнать их массы у лаборанта. Установить прибор устойчиво и горизонтально с помощью регулируемых опор 2. Шары должны

соприкасаются в положении равновесия, что достигается регулировочным винтом 5. Удар должен быть центральным, что достигается регулированием длины нитей подвеса.

Установить шкалы так, чтобы положение равновесия шаров было близко нулю каждой шкалы, закрепить шкалы. Зафиксировать положения равновесия шаров в делениях шкал.

Включить установку в сеть 220 В, нажать кнопку «Сеть» на панели. При этом должны загореться лампы цифрового индикатора.

Измерить длину нитей подвеса (до центра шаров) линейкой. Измерения повторить три раза. Найти среднее значение L и использовать его в расчетах.

Упражнение 1.

1. Подвесить на нити два шара с покрытием из пластилина.
2. Отклонить первый шар до соприкосновения с электромагнитом 11. Шар будет удерживаться магнитом. Отметить показания по шкале 7 (рис.2.5). Определить угол отклонения шара α_{01} от начального положения. (Одно деление шкалы - 1°).
3. Проверить, находится ли второй шар в состоянии покоя в положении равновесия (если нужно - придержать рукой).
4. Нажать кнопку «Пуск». Произойдет неупругий удар шаров.
5. Найти угол отклонения α шаров после удара.
6. Используя формулу (2.25) или (2.26), рассчитать потери энергии при неупругом ударе ΔE - энергию деформации. Из формулы (2.27) найти δ .
7. Повторить п.п 1...5 три раза для каждого значения угла $\alpha_{01} = 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$. Результаты занести в табл.2.2.

Таблица 2.2

Материалы шаров: пластилин - пластилин

	α_{01}								
	15°			10°			5°		
№ п.п	α град	ΔE Дж	δ -	α град	ΔE Дж	δ -	α град	ΔE Дж	δ -
1									
2									
3									
среднее значение									

Упражнение 2.

1. Заменить второй шар на металлический.

2. Повторить упражнение 1.
3. Рассчитать потери энергии на неупругую деформацию по формулам (2.25) - (2.27) и результаты занести в табл.2.3.

Таблица 2.3

Материалы шаров: пластилин - металл

	α_{01}								
	15°			10°			5°		
№ п.п	α град	ΔE Дж	δ -	α град	ΔE Дж	δ -	α град	ΔE Дж	δ -
1									
2									
3									
среднее значение									

Контрольные вопросы

1. Почему в работе требуется, чтобы удар был центральным?
2. Запишите кинетическую и потенциальную энергии шаров до и после удара.
3. Запишите закон сохранения энергии для неупругого удара двух тел.
4. Что такое энергия деформации, как она определяется в работе?
5. Опишите методику определения в работе скоростей шаров до и после удара.

РАЗДЕЛ 3

Образ природы в классическом естествознании: континуальная концепция

3.1. Модель поля и электродинамика Максвелла

Поле составляет совокупность значений физической величины, характеризующей среду в каждой ее точке.

Вещество и поле – фундаментальные понятия, на которых основана современная физическая картина мира. Понятие поля было введено английским ученым М. Фарадеем (1791-1867 г) и тесно связано с концепцией близкодействия*.

Любое поле описывается функцией, зависящей от координат и времени, так называемой полевой или волновой функцией. Она дает математическое выражение свойств поля и подчиняется некоторому уравнению†. Всякое изменение поля распространяется в пространстве с конечной скоростью, не превышающей скорости света в вакууме.

При этом динамический характер описания процессов сохраняется: налицо однозначная зависимость между физическими величинами.

Поля удобно представлять в виде силовых линий, линий тока, изотерм, изобар, эквипотенциальных поверхностей и т.д., они бывают скалярные и векторные, как показано в табл.3.1.

Таблица 3.1

Примеры полей

Скалярные поля	Векторные поля
Температур $T = T(x, y, z, \tau)$	Электрическое поле $\vec{E} = \vec{E}(x, y, z, \tau)$
Давлений $P = P(x, y, z, \tau)$	Магнитное поле $\vec{B} = \vec{B}(x, y, z, \tau)$
Концентраций $n = n(x, y, z, \tau)$	Гравитационное поле $\vec{g} = \vec{g}(x, y, z, \tau)$

Изучению электрического и магнитного полей посвящены лабораторные работы №№ 60, 64, 78.

* Согласно концепции близкодействия взаимодействие между объектами осуществляется посредством различных полей, непрерывно распределенных в пространстве.

† Модели поля применяются к различным областям жизни. Например, в экономике – это задачи о равновесии линейной модели экономики по аналогии с равновесием определенной физической системы.

Наиболее полное выражение в рамках классической физики модель поля нашла в теории Максвелла, получившей впоследствии название **классической электродинамики**. В 60-х годах XIX века английский физик Джеймс Максвелл (1831-1879 г.) развил представления Фарадея об электромагнитном поле и математически описал модель электромагнитного поля.

Согласно закону Фарадея любое изменение магнитного потока через проводящий контур приводит к возникновению электродвижущей силы в контуре, и по контуру идет ток. Это явление называется *электромагнитной индукцией*.

Для анализа явления электромагнитной индукции вводится понятие *магнитного потока*. Магнитным потоком через поверхность S называется скалярная физическая величина, определяемая соотношением

$$\Phi = \int_S \mathbf{B}_n \cdot d\mathbf{S}, \quad (3.1)$$

где \mathbf{B}_n – проекция вектора индукции магнитного поля на нормаль к элементу поверхности $d\mathbf{S}$.

По *закону Фарадея* ЭДС электромагнитной индукции ε_i в контуре определяется скоростью изменения магнитного потока, пронизывающего контур

$$\varepsilon_i = -\Phi' \quad \text{или} \quad \varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.2)$$

Знак «-» в законе (3.2) отражает правило Ленца: индукционный ток всегда направлен таким образом, что его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного потока через контур.

Изучение электромагнитной индукции проводится в лабораторных работах №№ 65, 76.

Возникновение тока в контуре обусловлено тем, что в результате электромагнитной индукции на носители тока – заряды – действуют сторонние силы, т.е. силы неэлектростатического происхождения.

В этой связи Максвелл предположил, что *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве переменное электрическое поле*, которое и является причиной возникновения тока в контуре. Таким образом, сам контур играет второстепенную роль, т.е. выполняет функцию своеобразного «прибора», обнаруживающего это электрическое поле.

Более того, согласно Максвеллу, возможно и обратное: *изменение электрического поля должно вызвать появление в окружающем пространстве переменного магнитного поля*.

Следовательно, в пространстве создается электромагнитное поле. Таким образом, из теории Максвелла вытекает существование электромагнитных волн – переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью. Это поле может распространяться как в среде, так и в вакууме. В дальнейшем было доказано, что в вакууме эта скорость есть скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Заметим, что на более ранних этапах развития естествознания предполагалось, что для распространения электромагнитных волн необходима некая среда – так называемый «эфир» (этот термин с другим смыслом сохранился в радио и телевидении).

Из теории Максвелла вытекает возможность «автономного» существования электромагнитного пол в пространстве и времени, как отдельного вида материи.

3.2. Электромагнитные волны, явления волновой оптики

Окончательное признание теория Максвелла получила после его смерти, когда ее положения были подтверждены опытами Генриха Герца (1857-1894 г.). Герц установил тождественность электромагнитных и световых волн.

На рис. 3.1 представлена шкала электромагнитных волн.

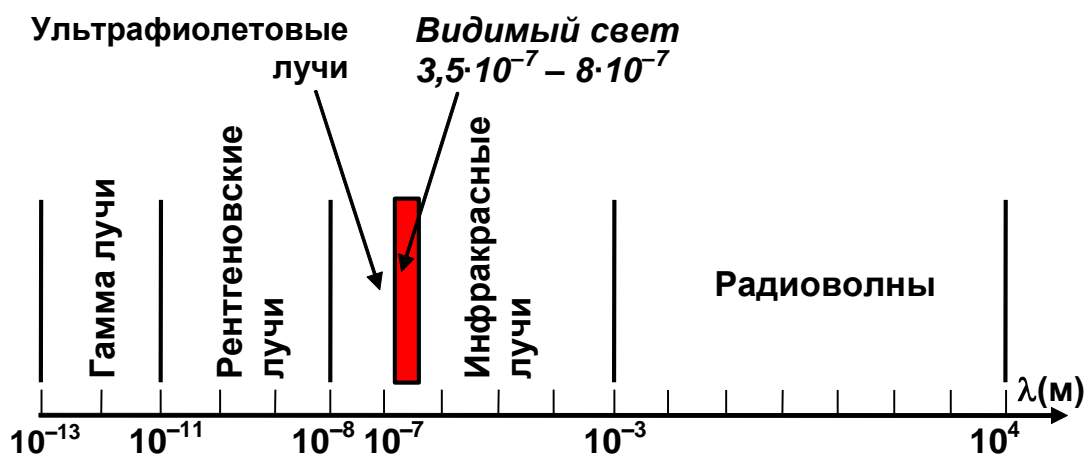


Рис. 3.1

Как видно из рис.3.1 различают несколько основных диапазонов электромагнитных волн. Изучение электромагнитных волн в области видимого диапазона и прилегающих областях (ультрафиолетовой и инфракрасной) осуществляется в волновой оптике.

Важнейшие явления в волновой оптике: *интерференция* и *дифракция*. Они широко используются в современной цивилизации; в

частности, широко применяются для контроля качества микросхем и печатных плат, линз телескопов и т.д.*

Интерференция – явление перераспределения интенсивности света при наложении двух или нескольких волн, подчиняющихся определенным условиям. В результате интерференции наблюдается так называемая интерференционная картина, представляющая собой чередование светлых и темных полос различной формы. Анализ интерференционной картины позволяет определять малые размеры, например толщину пленки, показатели преломления различных сред и многое другое.

Интерференция световых волн изучается в лабораторных работах №№ 109, 110.

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с неоднородностями, что приводит к отклонениям от законов геометрической оптики.

Большое практическое применение имеет дифракция света на дифракционной решетке. Дифракционная решетка - это совокупность большого числа щелей, разделенных непрозрачными промежутками.

Если на дифракционную решетку падает не монохроматический[†] свет, то дифракционная картина будет представлять собой спектры полос различного цвета. На изучении дифракционного спектра основан, в частности, спектральный метод анализа состава различных веществ.

Дифракция света на дифракционной решетке исследуется в лабораторной работе № 114.

Вопросы по разделу 3

12. В чем заключаются понятие поля и концепция близкодействия?
13. Приведите примеры скалярных и векторных полей.
14. Что такое магнитный поток?
15. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея.
16. На каких принципах базируется классическая электродинамика Максвелла?
17. Что называется электромагнитной волной?
18. Приведите и объясните шкалу электромагнитных волн.
19. Какие основные явления в волновой оптике Вы знаете? Назовите примеры их применения.
20. Что называется интерференцией света?
21. Что называется дифракцией света?

* Примером использования интерференции и дифракции является **голография** – метод записи и воспроизведения объемных изображений.

[†] Монохроматическим называется свет одной длины волны.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 60

Изучение электростатического поля

Цель работы: изучение электростатического поля, созданного заряженными электродами разной формы, и описание его с помощью следов эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

Краткая теория

В пространстве, окружающем электрические заряды, существует электростатическое поле. *Напряженность* электрического поля \vec{E} в рассматриваемой точке – векторная величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}. \quad (3.3)$$

Единицы измерения напряженности $[E] = 1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$.

Направление вектора напряженности в каждой точке можно наглядно изобразить, пользуясь понятием силовой линии или линии вектора \vec{E} , касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности. Силовые линии электростатического поля разомкнуты, они начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах.

Густота силовых линий, т.е. число силовых линий, пересекающих единичную площадку в направлении нормали к ней, численно равна напряженности поля в этой точке.

Энергетической характеристикой поля является *потенциал* φ – скалярная характеристика электростатического поля, равная отношению потенциальной энергии U взаимодействия заряда с полем к величине этого заряда

$$\varphi = \frac{U}{q}. \quad (3.4)$$

Потенциальная энергия (ее изменение) равна работе перемещения заряда из данной точки поля в бесконечность т.е. потенциал поля в данной точке определяется работой поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q}. \quad (3.5)$$

Единицы измерения электрического потенциала

$$[\varphi] = \frac{[U]}{[q]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В (Вольт)}.$$

Значения потенциала φ и потенциальной энергии U зависят от выбора начала отсчета, обычно принимается $\varphi_\infty = 0$.

Эквипотенциальная поверхность – поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Эквипотенциальные поверхности одного поля не пересекаются между собой.

Потенциал и напряженность электрического поля связаны соотношением

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi; \quad (3.6)$$

где знак « \rightarrow » означает, что вектор \vec{E} направлен в сторону убывания потенциала, как это показано на рис.3.2 ($\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$).

Градиентом потенциала называется вектор, направленный в сторону возрастания потенциала и равный изменению потенциала на единицу длины, отсчитываемой в направлении нормали к эквипотенциальной поверхности:

$$\text{grad}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}. \quad (3.7)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные положительные векторы (орты).

Силовые линии всегда нормальны (ортогональны) к эквипотенциальным поверхностям. В частности, силовые линии нормальны к поверхности проводника, находящегося в электрическом поле, которая является эквипотенциальной (см.рис.3.3).

Следует заметить, что соотношения (3.6), (3.7), записанные в проекции на направление силовой линии, принимают более простой вид

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dn}\vec{n}. \quad (3.8)$$

Методика измерений

Экспериментально измерить потенциал проще, чем напряженность поля. Поэтому в работе изучается распределение потенциала в электростатическом поле путем построения следов эквипотенциальных поверхностей на плоском поле, а силовые линии строятся потом, как ортогональные кривые к семейству следов эквипотенциальных поверхностей.

Для нахождения положения точек с нужными потенциалами используется метод зондирования. Зонд устроен так, чтобы он

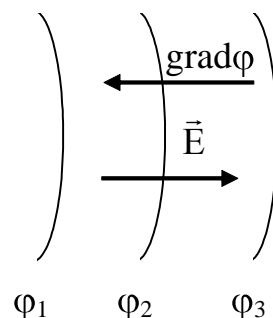


Рис. 3.2

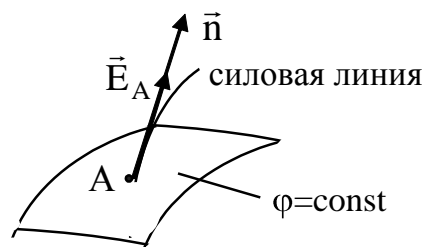


Рис. 3.3

минимально нарушал своим присутствием исследуемое поле. В качестве проводящей среды используется вода, в ней заряды будут натекать на зонд, и он примет значение потенциала той точки, в которую помещен. Зонд соединен проводником с вольтметром, измеряющим потенциалы поля.

По результатам измерения потенциала строится график зависимости потенциала от расстояния между электродами $\varphi = f(x)$ по которому методом численного дифференцирования находятся значения напряженности электростатического поля в исследуемых точках x_i .

Экспериментальная установка

Для исследования электростатического поля предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.3.4. Она включает в себя прозрачную ванну 3 из оргстекла, наполненную водопроводной водой, с координатной сеткой на дне и электродами 2. В качестве электродов используются: пластина, небольшой цилиндр и острие в разных сочетаниях.

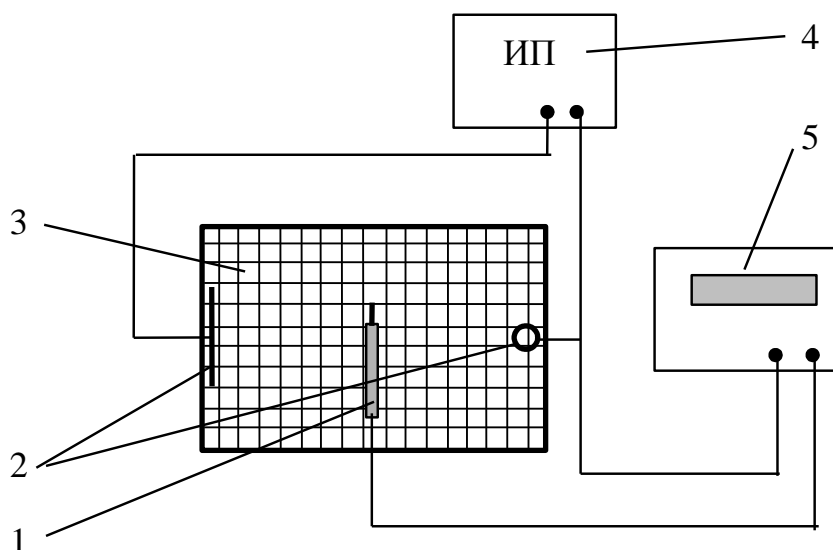


Рис. 3.4

На электроды от источника питания 4 подается постоянная разность потенциалов. Зонд и один из электродов соединены с цифровым вольтметром 5.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить установку к работе (рис.3.4). Соединить проводниками электроды ванны с клеммами источника питания 4 для напряжения $u = 12$ В.
2. Соединить зонд и один из электродов с цифровым вольтметром 5.

3. Подать напряжение $u = 220 \text{ В}$ на цифровой вольтметр и источник питания (кнопки «Сеть»).

4. На листе с миллиметровой бумагой (журнал для лабораторных работ) в масштабе 1:1 нарисовать внутренний периметр ванны и электроды, как показано на рис.3.5.

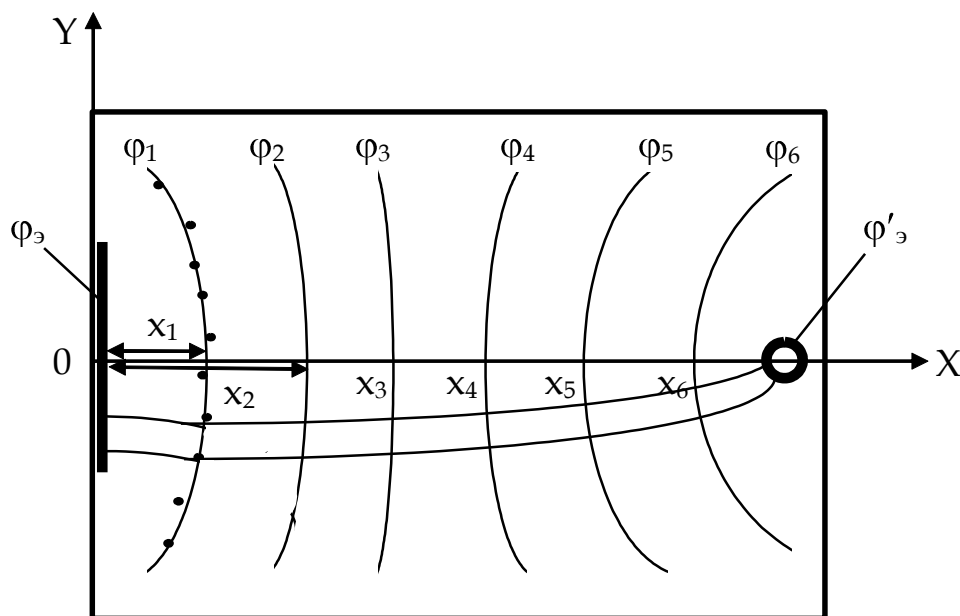


Рис. 3.5

5. С помощью зонда определить потенциалы электродов (φ_3 и φ'_3). Наметьте значения потенциалов следов 6–7 эквипотенциальных поверхностей в диапазоне ($\varphi_3 - \varphi'_3$): $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$

6. С помощью зонда найти на дне ванны по 8–10 точек для каждой эквипотенциальной кривой. Определить положение этих точек в ванне, и, пользуясь координатной сеткой, перенести их на миллиметровую бумагу в журнал. Соединить экспериментальные точки плавными кривыми. Схема одного из вариантов эквипотенциальных кривых показана на рис.3.5.

7. Отключить установку от сети.

8. Провести 5–6 силовых линий так, чтобы они пересекали эквипотенциальные кривые под углом 90° и подходили к поверхности электродов под тем же углом. Стрелками указать направление силовых линий согласно формула (3.6), (3.8).

9. Занести в табл.3.2 координаты x_i точек пересечения эквипотенциальных кривых с осью OX (см. рис.3.5) и соответствующие значения потенциала φ_i . Построить график зависимости $\varphi = f(x)$ и провести сглаженную кривую, как это показано на рис.3.6.

10. Выделить на оси OX около каждого значения x_i малый интервал (например, $\Delta x = 0,5 \text{ см}$) так, чтобы значение x_i находилось в центре

этого интервала (см. рис.3.6). Записать в табл.3.2 приращение потенциала $\Delta\varphi_i$, соответствующее этому интервалу на сглаженной кривой.

11. Согласно формуле (3.8) найти значения напряженности поля для точек на оси OX:

$$E_{xi} = \Delta\varphi_i / \Delta x_i.$$

12. Построить график зависимости $E_x = f(x)$ и провести сглаженную кривую.

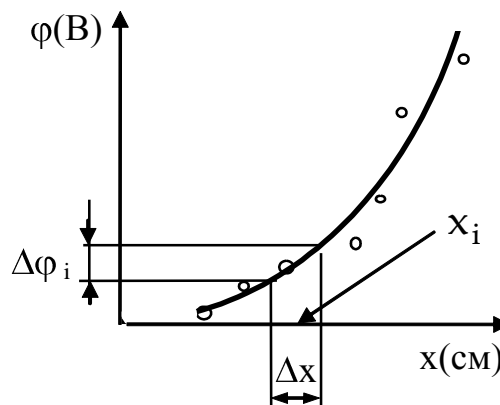


Рис. 3.6

Таблица 3.2

№ п/п	x_i см	φ_i В	Δx_i м	$\Delta\varphi_i$ В	$E_{xi} = \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta x}$ В/см
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Контрольные вопросы

1. Что называется напряжённостью электростатического поля?
2. Какие линии называются силовыми? Почему они не могут пересекаться?
3. Потенциал электростатического поля.
4. Какие поверхности называются эквипотенциальными?
5. Как связаны напряжённость и потенциал электростатического поля?
6. Что означает понятие «градиент потенциала»?
7. Как в работе измеряются потенциалы точек электрического поля?
8. На основании каких закономерностей электростатических полей проводятся силовые линии?
9. В чем заключается метод численного дифференцирования для расчета напряженности поля E_x ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 64

Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла

Цель работы: исследование магнитного поля на оси соленоида с использованием датчика Холла.

Краткая теория

Магнитное поле создается движущимися зарядами или токами. Основной характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции* \vec{B} . Единицы измерения индукции $[B] = 1 \text{ Тл}$.

Направление вектора \vec{B} можно определить с помощью магнитной стрелки. Вектор магнитной индукции всегда направлен вдоль стрелки от ее южного полюса к северному. *Силовой линией* магнитного поля называется замкнутая линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} .

В данной работе изучается магнитное поле, созданное током в соленоиде – длинной катушке с большим числом витков.

В теории существует понятие бесконечно длинного соленоида, для которого длина соленоида $L \gg r$, где r – радиус витка. Для этого случая магнитное поле внутри соленоида вдали от его концов однородно и направлено вдоль оси соленоида. Индукция этого поля может быть рассчитана по формуле

$$B_{\infty} = \mu_0 i n, \quad (3.9)$$

где $\mu_0 = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, i – сила тока в соленоиде, n – число витков, приходящееся на единицу длины соленоида:

$$n = N/L. \quad (3.10)$$

В формуле (3.10) N – общее число витков в соленоиде.

На самом деле, разумеется, любой соленоид имеет конечные размеры. Магнитное поле внутри соленоида в областях, близким к его торцам, становится неоднородным. Приблизительный вид изменения индукции магнитного поля вдоль оси соленоида показан на рис.3.7.

Значение $x = 0$ соответствует средней точке на оси соленоида. Величина индукции магнитного поля в этой точке может быть определена по формуле

$$B_0 = \frac{\mu_0 i N}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (3.11)$$

где D – диаметр соленоида, L – его длина.

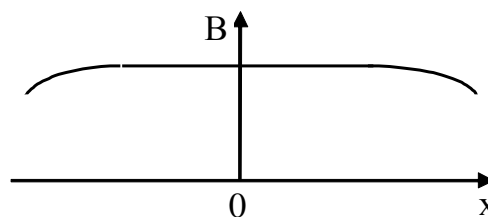


Рис. 3.7

Методика измерений

В работе для изучения индукции магнитного поля на оси соленоида используется метод, основанный на явлении (эффекте) Холла. Оно заключается в том, что в твердом полупроводнике (или проводнике) с током плотностью \vec{j} , помещенном в магнитное поле с индукцией \vec{B} , возникает электрическое поле напряженностью \vec{E} .

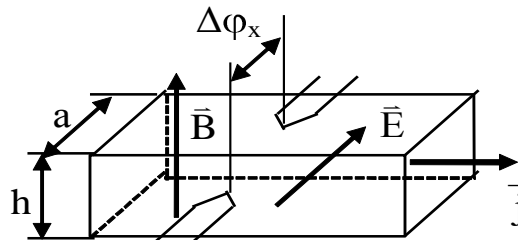


Рис. 3.8

Как следствие, между электродами, касающимися боковых граней образца, устанавливается разность потенциалов $\Delta\varphi_x$ (см. рис.3.8). По этой разности потенциалов может быть рассчитана величина индукции магнитного поля

$$B = \frac{\Delta\varphi_x}{u_x}, \quad (3.12)$$

где u_x – величина, называемая чувствительностью датчика, в котором реализуется эффект Холла.

Экспериментальная установка

В данной работе для изучения магнитного поля внутри соленоида используется полупроводниковый датчик магнитного потока, который состоит из датчика Холла и усилителя (на рис.3.9 обозначен цифрой 1).

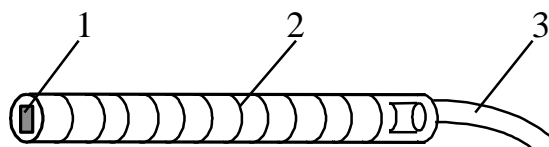


Рис. 3.9

Полупроводниковый датчик располагается на торце специального штока (зонда), который перемещается по оси соленоида. Для определения положения штока внутри соленоида на его боковой грани нанесена сантиметровая шкала 2. К штоку подсоединен жгут 3 для подключения электродов. В отсутствии магнитного поля ($B = 0$) $\Delta\varphi_x$ должна быть равна нулю. Однако усилитель постоянного тока имеет на выходе стабильную разность потенциалов $\delta\varphi_x$, указанную в паспорте датчика, что необходимо учесть при измерениях.

Электрическая схема установки показана на рис.3.10.

Соленоид (ФПЭ–04) посредством кабеля 2 подключается к источнику питания (ИП). Ток i через соленоид фиксируется амперметром 3. Перемещая датчик 1 вдоль оси соленоида, измеряют ЭДС датчика $\Delta\varphi_x$ с помощью цифрового вольтметра В7–27А/1.

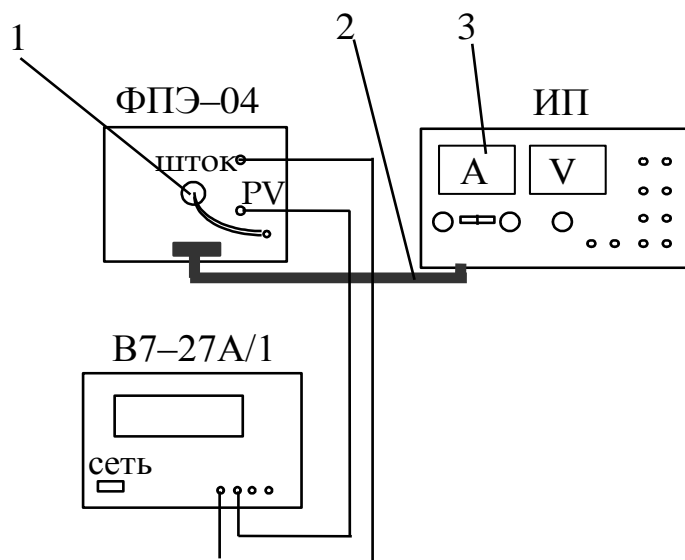


Рис. 3.10

Параметры установки:

чувствительность датчика магнитного потока $u_x = 31,25$ В/Тл;

разность потенциалов на усилителе при $B = 0$: $\delta\phi_x = 2,5$ В;

число витков соленоида $N = 3300$;

длина соленоида $L = 0,18$ м;

диаметр соленоида $D = 0,1$ м.

Порядок выполнения работыУпражнение 1.

Определение магнитной индукции в средней точке на оси соленоида с помощью датчика магнитного поля

1. Собрать схему, изображенную на рис.3.10. Для этого гнезда на лицевой панели кассеты ФПЭ-04 соединить с соответствующими гнездами цифрового вольтметра. Поставить шток с датчиком в среднее положение на оси соленоида («0» по шкале штока).

2. Включить источник питания и цифровой вольтметр в сеть (220 В). Измерить ЭДС датчика $\Delta\phi'_x$ в средней точке соленоида для токов 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 А. Полученные результаты занести в табл.3.3.

Таблица 3.3

№ п.п.	i А	$\Delta\phi'_x$ В	$\Delta\phi_x$ В	B_0 Тл	B Тл
1	0,5				
2	1,0				
3	1,5				
4	2,0				

3. Учесть систематическую погрешность измерения датчика, вычитая поправку $\delta\varphi_x$, приведенную в параметрах установки: $\Delta\varphi_x = \Delta\varphi'_x - \delta\varphi_x$.

4. Для каждого измерения определить экспериментальное значение индукции магнитного поля в центре соленоида по формуле (3.12).

5. Вычислить теоретическое значение индукции B_0 магнитного поля в центре соленоида по формуле (3.11).

6. На одном листе в одном масштабе построить графики зависимостей теоретического и экспериментального значений индукции магнитного поля от тока в соленоиде: $B_0 = f(i)$ и $B = f(i)$.

7. Построить зависимость ЭДС датчика $\Delta\varphi_x$ от тока в соленоиде $\Delta\varphi_x = f(i)$.

Упражнение 2.

Исследование изменения индукции магнитного поля вдоль оси соленоида

1. Установить величину тока в соленоиде $i = 1$ А.

2. Перемещая шток с датчиком магнитного поля вдоль оси соленоида с интервалом $\Delta x = 2$ см, измерять ЭДС датчика $\Delta\varphi'_x$. Результаты измерений занести в табл.3.4.

Таблица 3.4

x см	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
$\Delta\varphi'_x$ В											
$\Delta\varphi_x$ В											
B Тл											

3. Учесть систематическую погрешность измерения, вычитая поправку $\delta\varphi_x$, приведенную в параметрах установки: $\Delta\varphi_x = \Delta\varphi'_x - \delta\varphi_x$.

3. Вычислить значение магнитной индукции в соленоиде для каждого положения датчика Холла по формуле (3.12)

4. Построить график зависимости индукции магнитного поля от координаты вдоль оси соленоида $B = f(x)$. Примерный вид графика показан на рис.3.7.

Контрольные вопросы

1. Понятие магнитного поля и его основная характеристика - вектор индукции магнитного поля.

2. Что такое силовая линия магнитного поля?
3. Понятие бесконечно длинного соленоида. Расчет индукции магнитного поля внутри него.
4. Расчет индукции магнитного поля на оси реального соленоида.
5. В чем заключается эффект Холла?
6. Объясните полученные в работе экспериментальные зависимости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 78

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-буссоли

Цель работы: измерение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли.

Краткая теория

Магнитное поле создается движущимися зарядами или токами. Основной характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции* \vec{B} . Единицы измерения индукции $[B] = 1 \text{ Тл}$.

Направление вектора \vec{B} можно определить с помощью магнитной стрелки. Вектор магнитной индукции всегда направлен вдоль стрелки от ее южного полюса к северному.

Другой характеристикой магнитного поля является *вектор напряженности* \vec{H} . Для изотропной* среды вектора индукции \vec{B} и напряженности \vec{H} магнитного поля связаны между собой следующим образом:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}. \quad (3.13)$$

В этой формуле $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды. Единицы измерения напряженности $[H] = 1 \text{ А/м}$.

Силовой линией магнитного поля называется линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением векторов магнитной индукции \vec{B} и,

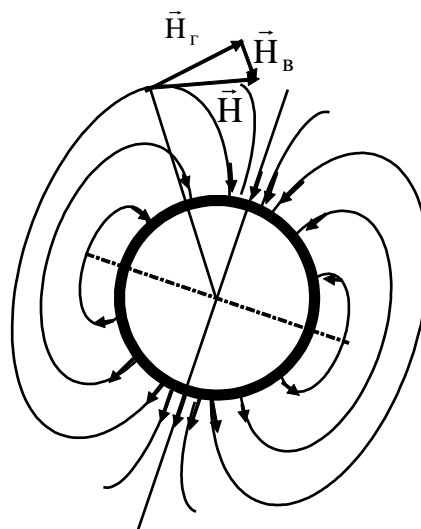


Рис. 3.11

* Изотропной называется среда, свойства которой одинаковы по всем направлениям.

соответственно, напряженности \vec{H} .

Данная лабораторная работа посвящена изучению магнитного поля Земли. Земля представляет собой естественный магнит, полюса которого располагаются недалеко (~ 300 км) от географических полюсов. Магнитное поле Земли показано на рис.3.11.

Поскольку по определению северный полюс магнитной стрелки указывает на север, то соответствующий магнитный полюс Земли, называется Южным магнитным полюсом (ведь северный полюс одного магнита притягивается к южному полюсу другого). Соответственно, на юге находится Северный магнитный полюс.

Через магнитные полюса Земли можно провести магнитные меридианы, перпендикулярно к ним – линию большого круга – магнитный экватор – и параллельно последнему линии малых кругов – магнитные параллели. Таким образом, каждой точке на Земле будут соответствовать не только географические, но и магнитные координаты.

Если в данной точке Земли свободно подвесить магнитную стрелку (т.е. подвесить за центр масс так, чтобы она могла поворачиваться и в горизонтальной и в вертикальной плоскостях), то она установится по направлению напряженности магнитного поля Земли в данной точке.

Но так как магнитное поле Земли – это поле прямого магнита, ясно, что силовые линии этого поля лишь на магнитных полюсах вертикальны, а на магнитном экваторе горизонтальны (рис.3.11). В любой другой точке земной поверхности силовая линия и касательная к ней напряженность магнитного поля располагаются под углом к вертикали в этой точке Земли и, значит, под углом к горизонтальной плоскости в данной точке.

Из-за несовпадения магнитных и географических полюсов Земли не совпадают и плоскости магнитного и географического меридианов, проходящих через данную точку земной поверхности. Таким образом, положение свободно подвешенной магнитной стрелки характеризуется двумя углами α и β , определенными для данной точки Земли.

Магнитное склонение α – угол между направлениями географического и магнитного меридианов (рис.3.12).

Различают восточное и западное склонение (северный полюс стрелки отклоняется соответственно вправо или влево от географического меридиана).

Магнитное наклонение β – угол между направлением напряженности магнитного поля в данной точке и горизонтальной плоскостью (рис.3.13). Наклонение бывает северное или южное (северный или южный конец стрелки ниже горизонтальной плоскости).

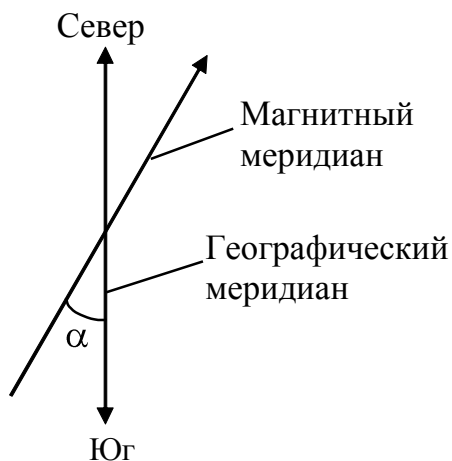


Рис. 3.12

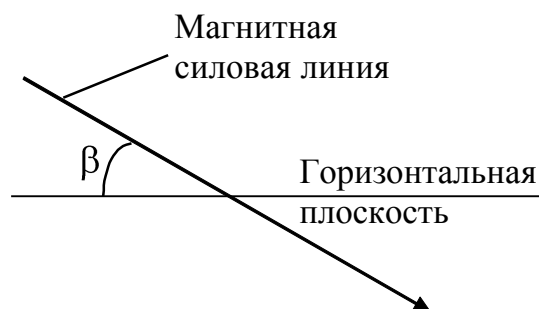


Рис. 3.13

Эти два угла – склонение и наклонение – называют элементами земного магнетизма. Пример: для Москвы $\alpha \approx 8^\circ$ (восточное склонение), $\beta \approx 70^\circ$ (северное наклонение).

Методика измерений

Итак, напряженность магнитного поля Земли для наших широт имеет **горизонтальную** \vec{H}_r и **вертикальную** \vec{H}_v составляющие. Магнитная стрелка, вращающаяся на закрепленной вертикальной оси, устанавливается в плоскости магнитного меридиана под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Если с помощью кругового тока около стрелки создать еще одно магнитное поле, то согласно принципу суперпозиции стрелка установится по направлению равнодействующей двух магнитных полей

$$\vec{H}_1 = \vec{H}_r + \vec{H}_0 \quad (3.14)$$

Так как поле кругового тока \vec{H}_0 нетрудно вычислить, зная ток, то горизонтальную составляющую земного магнитного поля можно определить по углу отклонения стрелки и величине поля тока.

Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли производится с помощью прибора, называемого тангенс – буссолью (см. рис.3.14). В центре короткой катушки с небольшим числом витков помещена на острие небольшая магнитная стрелка (при достаточно большом радиусе можно считать, что магнитная стрелка находится в однородном магнитном поле).

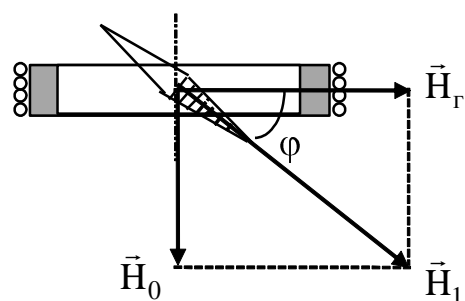


Рис. 3.14

Известно, что при прохождении тока i по катушке напряженность магнитного поля, созданного током в центре катушки, может быть определена по формуле

$$H_0 = \frac{Ni}{2r}, \quad (3.15)$$

где r – радиус витка буссоли, N – число витков в катушке.

Если контур буссоли установить в плоскости магнитного меридиана Земли, то горизонтальная составляющая магнитного поля Земли \vec{H}_r и поле кругового витка в центре буссоли окажутся перпендикулярными друг другу (см. рис.3.14). Тогда

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{H_0}{H_r} \quad \text{и} \quad H_r = \frac{Ni}{2r \cdot \operatorname{tg}\varphi}. \quad (3.16)$$

Экспериментальная установка

Электрическая схема экспериментальной установки для измерения H_r показана на рис.3.15.

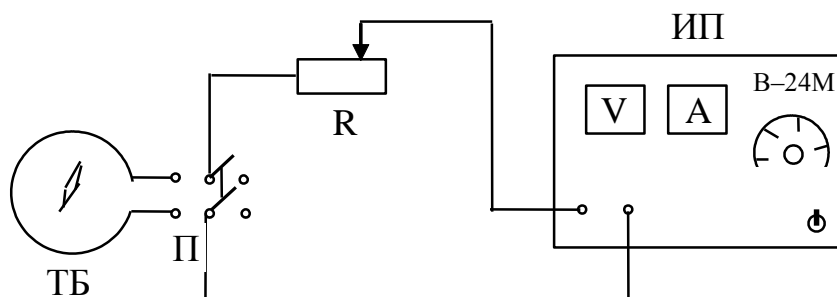


Рис. 3.15

С помощью переключателя Π тангенс – буссоль ТБ через реостат R подключается к источнику питания ИП .

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, показанную на рис.3.15.
2. С помощью магнитной стрелки установить катушку в плоскости магнитного меридиана.
3. Включить источник питания и подобрать такой ток i , чтобы угол отклонения стрелки был равен $\varphi = 45^\circ$. Записать значение тока по амперметру в табл.3.5.
4. Переключателем Π изменить направление тока на противоположное и при той же величине записать в таблицу угол отклонения φ' .
5. Рассчитать среднее арифметическое значение угла отклонения стрелки для двух измерений

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi + \varphi'}{2}.$$

Таблица 3.5

№ п.п.	число витков	i А	φ град.	φ' град.	$\bar{\varphi}$ град.	H _г А/м
1	2					
2	6					
3	12					

6. Повторить измерения 2–3 раза, изменяя число витков (указаны на катушке). Средний диаметр d витков измерить линейкой и определить радиус витков $r = d/2$.

7. Рассчитать величину \vec{H}_g по формуле (3.16) для каждого значения тока, числа витков и среднего значения угла $\bar{\varphi}$ для двух направлений тока в катушке.

8. Вычислить среднее значение \vec{H}_g и оценить ошибку измерений.

Контрольные вопросы

1. Векторы индукции и напряженности магнитного поля.
2. Что такое силовая линия магнитного поля?
3. Охарактеризуйте магнитное поле Земли.
4. Каковы элементы земного магнетизма?
5. Почему магнитная стрелка тангенс–буссоли должна быть малых размеров?
6. Опишите метод измерения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс–буссоли.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 65

Изучение явления взаимной индукции

Цель работы: исследование явления взаимной индукции двух коаксиально расположенных (соосных) катушек.

Краткая теория

В данной лабораторной работе изучается закон электромагнитной индукции Фарадея на примере *взаимной индукции* контуров. Пусть имеются два контура 1 и 2, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (рис.3.16).

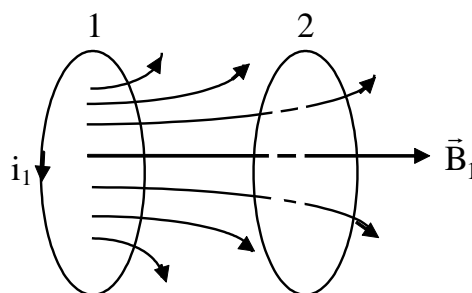


Рис. 3.16

Если по контуру 1 пропустить ток i_1 , то он создает поток магнитной индукции, пронизывающий контур 2, который будет пропорционален величине тока i_1 :

$$\Phi_{21} = M_{21}i_1. \quad (3.17)$$

Коэффициент пропорциональности M_{21} называется коэффициентом взаимной индукции контуров или взаимной индуктивностью контуров. Он зависит от формы и взаимного расположения контуров 1 и 2, а также от магнитных свойств среды.

При изменении тока в первом контуре магнитный поток через второй контур изменяется, следовательно, согласно закону Фарадея (3.2) в нем наводится ЭДС взаимной индукции

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}. \quad (3.18)$$

Если поменять местами контуры 1 и 2 и провести все предыдущие рассуждения, то получим

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}. \quad (3.19)$$

Можно показать, что коэффициенты взаимной индукции одинаковы:

$$M_{21} = M_{12}. \quad (3.20)$$

Методика измерений

В данной работе изучается коэффициент взаимной индукции между длинной катушкой 1 (L_1) и короткой катушкой 2 (L_2). Катушка 2 надевается на катушку 1 и может перемещаться вдоль ее оси. Питание одной из катушек, например 1, осуществляется от генератора звуковой частоты ГЗ–106, с которого через сопротивление R подается напряжение

$$u = u_0 \cos \omega t, \quad (3.21)$$

где u_0 – максимальное значение (амплитуда) напряжения, ω – циклическая частота колебаний напряжения источника, t – время.

При достаточно больших значениях сопротивления R ток, протекающий через катушку 1, можно определить по формуле

$$i_1 = \frac{u}{R} = \frac{u_0}{R} \cos \omega t. \quad (3.22)$$

Как следует из формулы (3.18) переменный ток в катушке 1 создает переменную ЭДС взаимной индукции в катушке 2

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{di_1}{dt} = M_{21} \frac{u_0}{R} \omega \sin \omega t. \quad (3.23)$$

Амплитуда ЭДС индукции в катушке 2

$$\varepsilon_{02} = M_{21} \frac{u_0}{R} \omega = M_{21} \frac{u_0}{R} 2\pi f, \quad (3.24)$$

где f – линейная частота сигнала от звукового генератора.

Из формулы (3.24) можно определить величину взаимной индуктивности контуров

$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{02}R}{2\pi f u_0}. \quad (3.25)$$

Если поменять местами катушки 1 и 2, то можно аналогично получить

$$M_{12} = \frac{\varepsilon_{01}R}{2\pi f u_0}. \quad (3.26)$$

Экспериментальная установка

Для изучения явления взаимной индукции предназначена кассета ФПЭ–05/06 «Взаимоиндукция», в которой расположены две катушки индуктивности 1 (L_1) и 2 (L_2) на одной оси и штوك со шкалой (Ш), показывающий взаимное расположение катушек 1 и 2. Электрическая схема установки показана на рис.3.17.

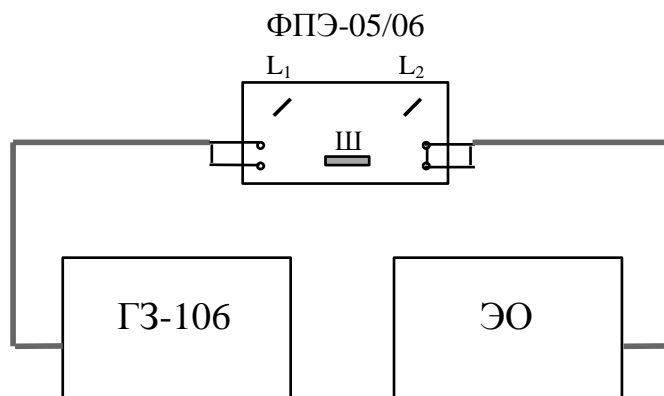


Рис. 3.17

Кассета подключается к звуковому генератору ГЗ–106. Вольтметр, расположенный на панели ГЗ–106, измеряет действующие (эффективные) значения напряжения:

$$u_{\text{эфф.}} = \frac{u_0}{\sqrt{2}}. \quad (3.27)$$

Для измерения амплитуды ЭДС взаимной индукции используется электронный осциллограф (ЭО).

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Измерение коэффициентов взаимной индукции M_{21} и M_{12} и исследование их зависимости от взаимного расположения катушек.

1. Собрать схему, изображенную на рис.3.17.
2. Задать напряжение $u_{\text{эфф.}} = 2$ В и частоту f сигнала генератора (по указанию преподавателя), подать напряжение на катушку L_1 (с

помощью переключателя Π_1), а ЭДС катушки L_2 подать на осциллограф (с помощью переключателя Π_2). Положение переключателя «V/дел» на передней панели осциллографа ЭО (С1–73) установить (0,02–0,05) В/дел (здесь указывается цена большого деления на экране ЭО).

3. Установить подвижную катушку L_1 в крайнее переднее положение. Перемещая ее в противоположное крайнее положение через 1 см, записывать значение координаты Z (расстояние между центрами катушек) и ЭДС взаимной индукции ε_{02} в цепи катушки L_2 в табл. 3.6.

Таблица 3.6

		$u_{\text{эфф.}} = 2 \text{ В}$		$f = \dots \text{ Гц}$			
Z см	ε_{02}		M_{21}	ε_{01}		M_{12}	
	дел.	В	Гн	дел.	В	Гн	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

4. По формуле (3.25) рассчитать значение M_{21} . Полученные данные занести в табл.3.6.

5. Поменяв местами катушки L_1 и L_2 (с помощью переключателей Π_1 и Π_2), повторить измерения по п.п. 2, 3 и по формуле (3.26) рассчитать M_{12} .

6. Построить графики зависимости M_{21} и M_{12} как функции координаты Z (расстояния между центрами катушек).

Упражнение 2.

Измерение M_{21} при различных значениях амплитуды питающего напряжения.

1. Поставить катушку L_1 в среднее положение относительно катушки L_2 .

2. Задать частоту звукового генератора ГЗ–106 по указанию преподавателя (например, 104 Гц).

Таблица 3.7

№ п.п	f = ... Гц		R = 10 ⁴ Ом
	u _{эфф.} В	ε ₀₂ В	M ₂₁ Гн
1	0,5		
2	1		
3	1,5		
4	2		
5	2,5		
6	3		
7	3,5		
8	4		
9	4,5		
10	5		

3. Измерить амплитуду ЭДС взаимной индукции ϵ_{02} при различных значениях напряжения $u_{эфф.}$ в цепи катушки 1 в интервале 0 – 5 В. Результаты занести в табл.3.7.

4. По формуле (3.25) рассчитать M_{21} . Полученные данные занести в табл.3.7.

Упражнение 3.

Измерение M_{21} при различных частотах питающего напряжения.

1. Поставить катушку L_1 в среднее положение относительно катушки L_2 .

Таблица 3.8

№ п.п	u _{эфф.} = ... В		R = 10 ⁴ Ом
	f Гц	ε ₀₂ В	M ₂₁ Гн
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

2. Задать напряжение генератора по указанию преподавателя (например, 2В).

3. Измерить амплитуду ЭДС взаимной индукции ε_{02} при различных частотах звукового генератора от 5 до 20 кГц (не менее 10 значений). Записать результаты в табл.3.8.

4. По формуле (3.25) рассчитать M_{21} . Полученные данные занести в табл.3.8.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление взаимной индукции?
2. Что такое коэффициент взаимной индукции катушек, от чего он зависит?
3. Запишите закон Фарадея для взаимной индукции двух катушек.
4. Как в работе определяется коэффициент взаимной индукции?
5. Объясните полученный график зависимости $M_{21} = f(Z)$.
6. Объясните результаты, полученные во втором и третьем упражнениях лабораторной работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 76

Изучение явления электромагнитной индукции

Цель работы: изучение зависимости электродвижущей силы (ЭДС) индукции от частоты вращения и ориентации катушки в магнитном поле Земли.

Методика измерений и экспериментальная установка

Принципиальная схема установки изображена на рис.3.18.

Установка состоит из катушки 1, которая может вращаться вокруг оси Y. Опора 2 может вращаться относительно оси X. При этом угол отклонения γ нормали \vec{n} от горизонтальной плоскости 3 может быть измерен по шкале 6. Опора 2, стрелка 8 и ось вращения контура Y фиксируются в заданном положении винтом 7. Катушка 1 соединяется с измерителем ЭДС индукции (милливольтметром 4) с помощью скользящих контактов 5.

Основная характеристика магнитного поля Земли – вектор напряженности \vec{H}_0 . Угол γ_1 между горизонтальной плоскостью 3 и вектором напряженности \vec{H}_0 магнитного поля Земли называется *углом магнитного наклона*. Для широты Москвы $\gamma_1 = 72^\circ$. Плоскость, проходящая через ось, соединяющую магнитные полюса, называется плоскостью магнитного меридиана. Магнитная стрелка компаса 9 всегда располагается в плоскости магнитного меридиана.

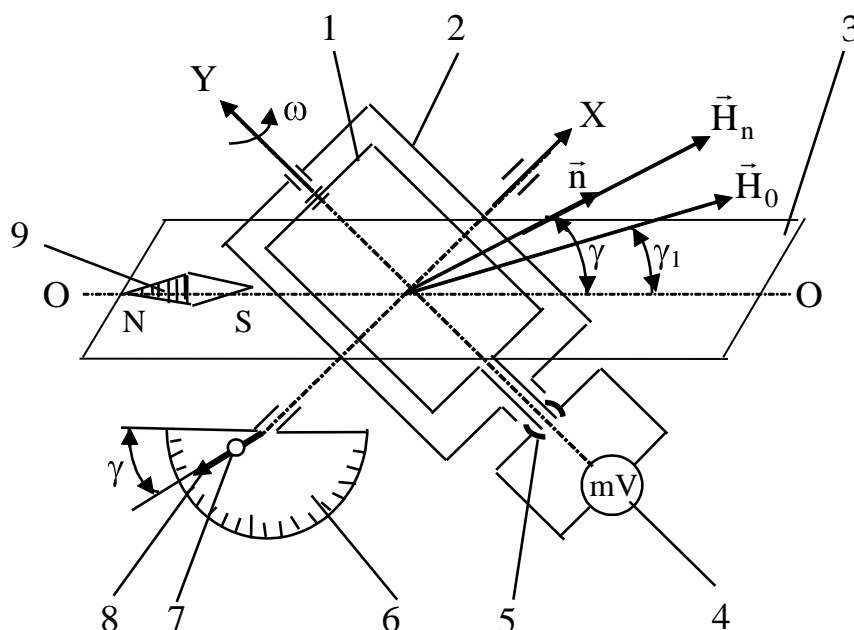


Рис. 3.18

В основе экспериментальной методики лежит закон Фарадея (3.2), в соответствии с которым ЭДС индукции ε_i возникает в катушке при вращении ее в магнитном поле Земли.

Если ось вращения Y катушки 1 перпендикулярна силовым линиям магнитного поля \vec{H}_0 ($\gamma = \gamma_1$), а катушка вращается с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$ (где f – частота вращения) вокруг оси Y , то магнитный поток, проходящий через катушку в любой момент времени t согласно формуле (3.1) запишется

$$\Phi = \Phi_0 \cos \alpha = B_0 S \cos \omega t, \quad (3.28)$$

где Φ_0 – максимальное значение магнитного потока, проходящего через катушку, B_0 – индукция магнитного поля Земли.

Для изотропной* среды вектора индукции \vec{B} и напряженности \vec{H} магнитного поля связаны между собой следующим образом:

$$\vec{B}_0 = \mu \mu_0 \vec{H}_0, \quad (3.29)$$

В этой формуле $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды. Тогда из формулы (3.29) получаем

$$\Phi = \mu \mu_0 H_0 S \cos \omega t. \quad (3.30)$$

По закону Фарадея ЭДС индукции в катушке, содержащей N витков, запишется

* Изотропной называется среда, свойства которой одинаковы по всем направлениям.

$$|\varepsilon_i| = N \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = N\omega \mu\mu_0 H_0 S \sin \omega t. \quad (3.31)$$

Из формулы (3.31) следует, что амплитуда ЭДС индукции в катушке

$$\varepsilon_{i0} = N\omega \mu\mu_0 H_0 S = 2\pi f \mu\mu_0 H_0 S N. \quad (3.32)$$

Милливольтметр измеряет эффективное значение ЭДС индукции, пропорциональное амплитуде ЭДС индукции $\varepsilon_{i\text{эфф.}} \sim \varepsilon_{i0}$, следовательно, согласно формуле (3.32), показания милливольтметра будут пропорциональны частоте вращения катушки f .

Если ось вращения Y не перпендикулярна \vec{H}_0 , то максимальный магнитный поток, пронизывающий катушку, будет меньше:

$$\Phi_{0_1} = \mu\mu_0 H_n S = \Phi_0 \cos(\gamma - \gamma_1), \quad (3.33)$$

а следовательно, ЭДС индукции катушки ε_{i0} и показания милливольтметра 4 (рис.3.18) будут меньше. ($\cos(\gamma - \gamma_1) < 1$).

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Определение зависимости ЭДС индукции от частоты.

1. Поворачивая опору 2 вокруг оси X , совместить ось вращения Y с горизонтальной плоскостью 3. В горизонтальной плоскости установить ось вращения Y по направлению магнитной стрелки 9.

2. Подключить милливольтметр к контактам коллектора 5.

3. Определить зависимость эффективной ЭДС индукции от частоты вращения контура при выбранной ориентации его в магнитном поле Земли, определяемой углом γ . Для этого нужно измерить время t за $n = 20$ полных оборотов и рассчитать частоту вращения: $f = n/t$. Показания милливольтметра 4 фиксировать в делениях шкалы. Полученные данные занести в табл.3.9.

Таблица 3.9

n = 20 оборотов			
№ п.п.	t с	f Гц	$\varepsilon_{i\text{эфф.}}$ дел.
1			
2			
3			
4			
5			

4. Повторить измерения для 4–5 других значений частоты f .

5. Построить график зависимости эффективной ЭДС индукции от частоты $\varepsilon_{i\text{эфф.}} = \varphi(f)$.

Упражнение 2.

Определение зависимости ЭДС индукции от ориентации контура в магнитном поле Земли.

1. Выбрать удобную (для измерения ЭДС милливольтметром) частоту вращения контура в магнитном поле Земли. Поддерживая ее постоянной, определить зависимость эффективной ЭДС индукции от ориентации катушки в магнитном поле Земли. Для этого установить ось вращения Y катушки в плоскости магнитного меридиана и измерить ЭДС индукции при различных углах γ (от 0 до 180° через каждые 20°), отсчитываемых по шкале 6 стрелкой 8. При каждом значении γ закрепляется винт 7, фиксирующий опору 2 и стрелку 8, связанные жестко между собой.

2. Полученные данные занести в табл.3.10.

Таблица 3.10

γ (°)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$\varepsilon_{i\text{эфф.}}$ (дел)										

3. Построить график зависимости эффективных значений ЭДС индукции от угла γ : $\varepsilon_{i\text{эфф.}} = \varphi(\gamma)$.

4. Определить по графику угол магнитного наклона γ_1 .

Контрольные вопросы

1. Какие основные характеристики магнитного поля Вы знаете?
2. Запишите формулы для магнитного потока и ЭДС индукции в катушке, вращающейся в магнитном поле Земли.
3. Объясните зависимость ЭДС индукции контура, вращающегося в магнитном поле Земли, от частоты вращения.
4. Объясните зависимость ЭДС индукции вращающегося контура от его ориентации в магнитном поле Земли.
5. Что такое угол магнитного наклона и как его определяют в данной работе?
6. Покажите, как направлено магнитное поле в лаборатории.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 109

Определение длин волн света при помощи бипризмы Френеля

Цель работы: знакомство с явлением интерференции когерентных световых волн с помощью бипризмы и измерение длин волн.

Краткая теория

Когерентными называются волны, у которых одинаковая частота, одинаковое направление колебаний электрической и магнитной составляющих волны и постоянная во времени разность фаз. При сложении двух или более когерентных волн наблюдается явление интерференции, которое заключается в стационарном перераспределении интенсивности света.

Для расчета интерференционной картины необходимо определить условия, при которых интенсивность света в той или иной точке пространства будет максимальна или минимальна.

Введем понятие *оптической разности хода* волн

$$\delta = L_2 n_2 - L_1 n_1, \quad (3.34)$$

где L – геометрическая длина пути, n – показатель преломления среды, в которой распространяется волна, равный

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3.35)$$

Здесь c – скорость света в вакууме, v – скорость света в среде.

Величина (Ln) называется *оптической длиной пути*.

Интенсивность света в точке наблюдения будет **максимальна**, если оптическая разность хода δ равна **целому числу длин волн**:

$$\delta = k\lambda, \quad (3.36)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, λ – длина волны света.

Интенсивность света будет **минимальной**, если оптическая разность хода δ равна **нечетному числу полуволн**:

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.37)$$

Для расчета длины волны λ необходимо определить оптическую разность хода волн (3.34) из схемы опыта и использовать условия максимума и минимума (3.36) и (3.37).

Методика измерений

Бипризма Френеля – это две призмы с малыми преломляющими углами β ($\sim 30'$), сложенные основаниями (рис.3.19).

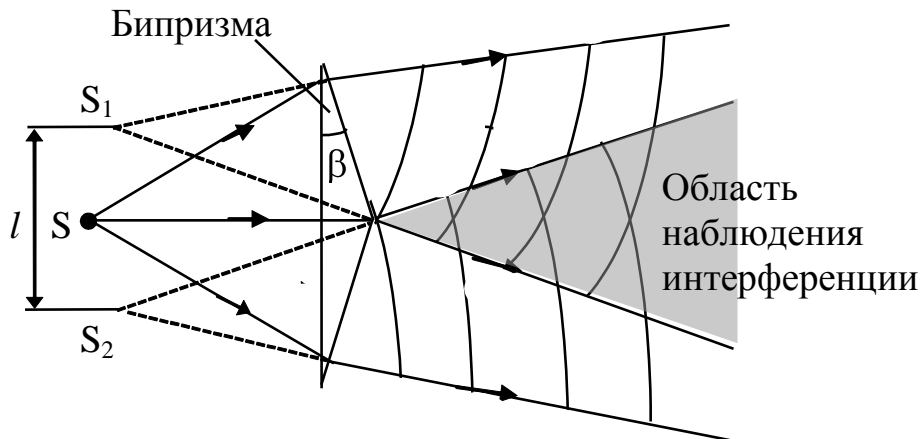


Рис. 3.19

Если представить себе на месте S линейный источник света (освещенную монохроматическим светом щель), то S_1 и S_2 будут линейными мнимыми когерентными источниками. Расположим параллельно им на расстоянии L экран, как показано на рис.3.20.

На рисунке также обозначены: x_k – расстояние от центра экрана до максимума k -го порядка; $\delta = d_2 - d_1$ – разность хода двух лучей, l – расстояние между мнимыми когерентными источниками, L – расстояние от мнимых источников до экрана.

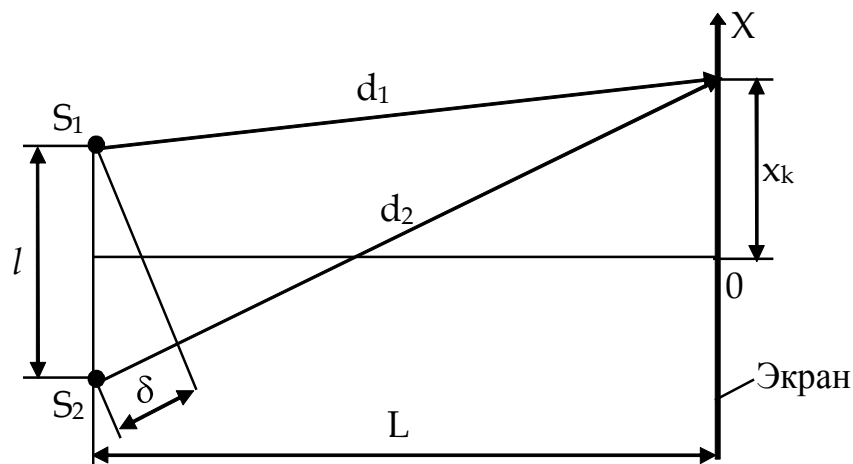


Рис. 3.20

В результате интерференции на экране появляются чередующиеся параллельные светлые и темные полосы. Ширина полосы Δx (например, расстояние между соседними светлыми полосами) может быть получена с использованием рис.3.20.

Из условного подобия треугольников (рис.3.20) можно выразить оптическую разность хода двух лучей, например:

$$\frac{\delta}{l} \approx \frac{x_k}{L}; \quad \delta = \frac{l}{L} x_k. \quad (3.38)$$

Подставляя в (3.38) условие максимума (3.36), получим выражение для максимума k -го порядка

$$x_k = \frac{k\lambda L}{l}. \quad (3.39)$$

Соответственно, для максимума $(k+1)$ порядка можно записать:

$$x_{k+1} = \frac{(k+1)\lambda L}{l}. \quad (3.40)$$

Из выражений (3.39) и (3.40) выразим ширину интерференционной полосы

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{L}{l}\lambda. \quad (3.41)$$

Отсюда получаем

$$\lambda = \frac{\Delta x l}{L}, \quad (3.42)$$

т.е. по измеренным параметрам установки (l и L) и ширине интерференционной полосы (Δx) можно определить длину волны света λ .

Экспериментальная установка

Для изучения интерференции с помощью бипризмы Френеля предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.3.21.

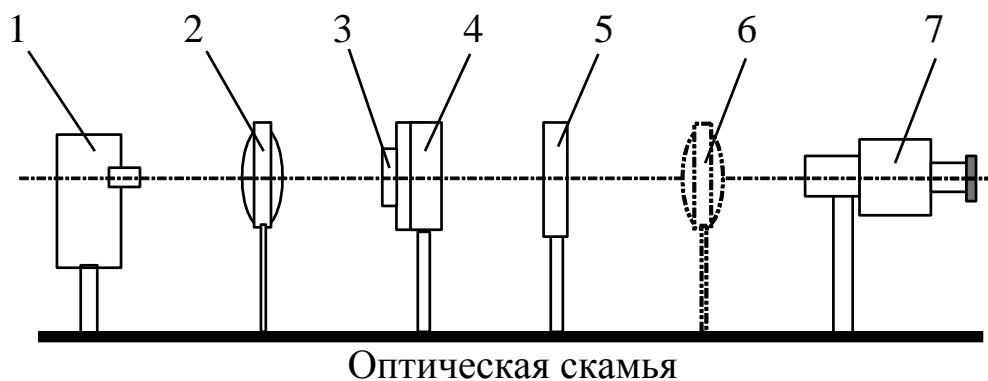


Рис. 3.21

На оптической скамье последовательно размещаются: источник света (лампа накаливания) 1, конденсор 2, светофильтр 3, щель 4, бипризма Френеля 5, окулярный микрометр 7. Расстояние между приборами определяется по разметке на оптической скамье.

При помощи окулярного микрометра 7 производят наблюдение интерференционной картины и измерение расстояния между интерференционными полосами.

Шкала окулярного микрометра показана на рис.3.22. На неподвижной сетке нанесены деления, цена которых 1 мм. На подвижной сетке имеются две риски 1 и перекрестие 2. Перемещение подвижной сетки осуществляется с помощью микрометрического винта микрометра. Цена деления микрометра 0,01 мм.

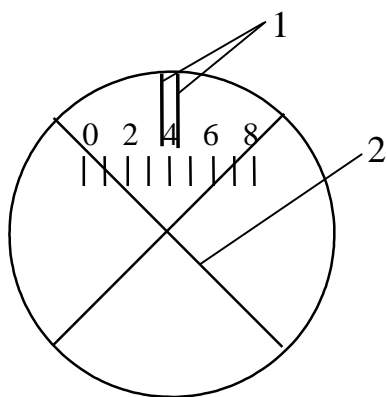


Рис. 3.22

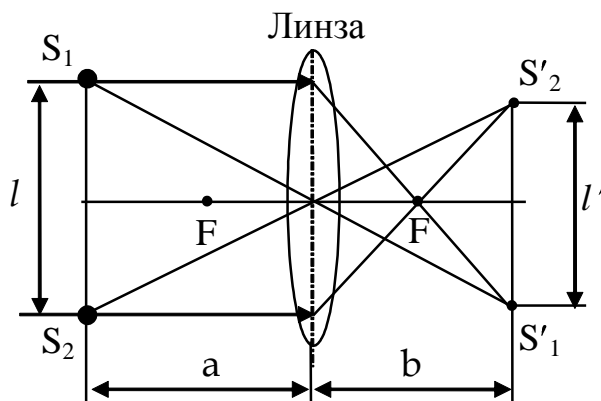


Рис. 3.23

При отсчете точку пересечения креста нитей вращением барабана микрометра совмещают сначала с одним концом измеряемого отрезка, а затем – с другим концом отрезка, каждый раз замечая показания шкалы окулярного микрометра (по положению подвижных рисок) и барабана.

Например, если на шкале микрометра между двумя рисками находится цифра 4 (см. рис.3.22), а на барабане микрометрического винта зафиксировано 29 делений, то полученное измерение будет 4,29 мм или $4,29 \cdot 10^{-3}$ м.

Разность измерений в первом и втором отсчетах дает величину измеряемого отрезка.

Для определения расстояния l (рис.3.20) между мнимыми источниками S_1 и S_2 на оптическую скамью между бипризмой и окулярным микрометром помещают собирающую линзу 6 (рис.3.21). Расстояние между мнимыми источниками можно найти из схемы хода лучей в линзе, показанной на рис.3.23.

На рис.3.23 l' – расстояние между изображениями мнимых источников, видимое в окуляре и определяемое окулярным микрометром, b – расстояние между линзой 6 (рис.3.21) и окулярным микрометром 7, a – расстояние между щелью 4 и линзой 6 (определяемые по разметке на оптической скамье).

Из подобия треугольников на рис.3.23 получаем

$$\frac{l}{l'} = \frac{a}{b}, \quad \text{т.е.} \quad l = \frac{l'a}{b}. \quad (3.43)$$

Тогда расчетная формула (3.42) для определения длины волны света принимает вид:

$$\lambda = \frac{\Delta x a l'}{L b}. \quad (3.44)$$

Порядок выполнения работы

1. Установить приборы на оптической скамье в соответствии со схемой на рис.3.21 (без линзы 6).

2. Включить питание лампы накаливания.

3. Установить светофильтр и определить с помощью микрометрического винта расстояние между несколькими ($N = 3, 5, 7$) интерференционными полосами ($N \cdot \Delta x$). Найти для каждого измерения расстояние между двумя соседними полосами Δx и среднее значение $\overline{\Delta x}$ (ширину полосы) по формуле

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3}{3}.$$

Результаты измерений и цвет светофильтра записать в табл.3.11.

4. Получить значение $\overline{\Delta x}$ в метрах.

5. Поменять светофильтр и повторить измерения по п.п. 3,4. Записать измерения в табл.3.12.

Таблица 3.11

Светофильтр _____

Число полос N	$N\Delta x$ мм	Δx мм	$\overline{\Delta x}$ мм	$\overline{\Delta x}$ м	λ м
3					
5					
7					

Таблица 3.12

Светофильтр _____

Число полос N	$N\Delta x$ мм	Δx мм	$\overline{\Delta x}$ мм	$\overline{\Delta x}$ м	λ м
3					
5					
7					

6. Определить по оптической скамье L – расстояние между щелью 4 и окулярным микрометром 7 (рис.3.21) и d – расстояние между щелью 4 и бипризмой 5.

7. Поставить на оптическую скамью линзу б и, передвигая ее, добиться отчетливой видимости двух изображений щелей (мнимых источников) в окулярном микрометре. Измерить микрометром расстояние между ними l' . По линейке на оптической скамье измерить расстояния а и b (рис.3.23).

8. Повторить измерения по п.7 для другого светофильтра.

9. По формуле (3.44) определить длину волны света λ для каждого светофильтра.

10. Отключить установку от сети.

Контрольные вопросы

1. Какие волны называются когерентными?
2. Что такое оптическая длина пути и разность хода двух лучей?
3. В чем заключается условие максимума и минимума интенсивности света при интерференции лучей?
4. Как рассчитать ширину интерференционной полосы для интерференции от двух источников?
5. Что такое бипризма Френеля? Какова ее роль в лабораторной работе?
6. Для чего в данной работе между щелью и окулярным микрометром помещается линза?
7. Получите расчетную формулу работы для определения длины волны света.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 110

Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

Цель работы: измеряя радиусы колец Ньютона при интерференции в отраженном свете, определить радиус кривизны линзы.

Краткая теория

Когерентными называются волны, у которых одинаковая частота, одинаковое направление колебаний электрической и магнитной составляющих волны и постоянная во времени разность фаз. При сложении двух или более когерентных волн наблюдается явление интерференции, которое заключается в стационарном перераспределении интенсивности света.

Для расчета интерференционной картины необходимо определить условия, при которых интенсивность света в той или иной точке пространства будет максимальна или минимальна.

Введем понятие оптической разности хода волн

$$\delta = L_2 n_2 - L_1 n_1, \quad (3.45)$$

где L – геометрическая длина пути, n – показатель преломления среды, в которой распространяется волна, равный

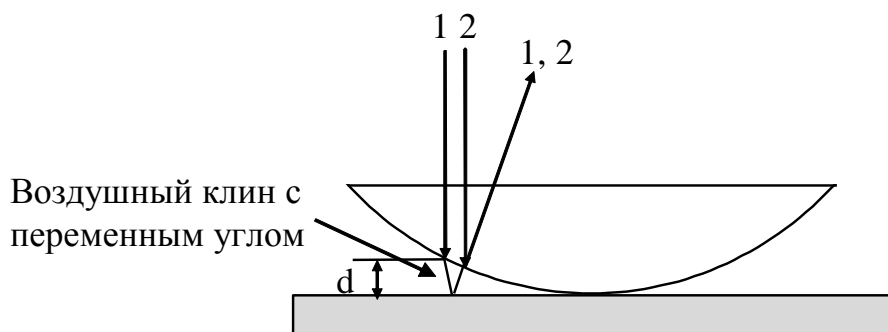


Рис. 3.24

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3.46)$$

Здесь c – скорость света в вакууме, v – скорость света в среде.

Величина (Ln) называется *оптической длиной пути*.

Интенсивность света в точке наблюдения будет **максимальна**, если оптическая разность хода δ равна **целому числу длин волн**:

$$\delta = k\lambda, \quad (3.47)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, λ – длина волны света.

Интенсивность света будет **минимальной**, если оптическая разность хода δ равна **нечетному числу полуволен**:

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.48)$$

Таким образом, расчет интерференции сводится к определению оптической разности хода волн (3.45) из схемы опыта и использования условий максимума и минимума (3.47) и (3.48).

Методика измерений

Положим плоско–выпуклую линзу с большим радиусом кривизны выпуклой стороной на блестящую поверхность плоскопараллельной стеклянной пластинки и осветим линзу параллельным пучком монохроматического света (рис.3.24), падающего нормально к плоской поверхности линзы.

Луч 2, отраженный от нижней поверхности линзы, будет интерферировать с лучом 1, отраженным от поверхности пластинки. Между этими лучами за счет воздушного промежутка переменной толщины d образуется оптическая разность хода δ . В результате у плоской поверхности линзы наблюдается интерференционная картина, имеющая вид кольцевых полос (темных и светлых) – колец Ньютона.

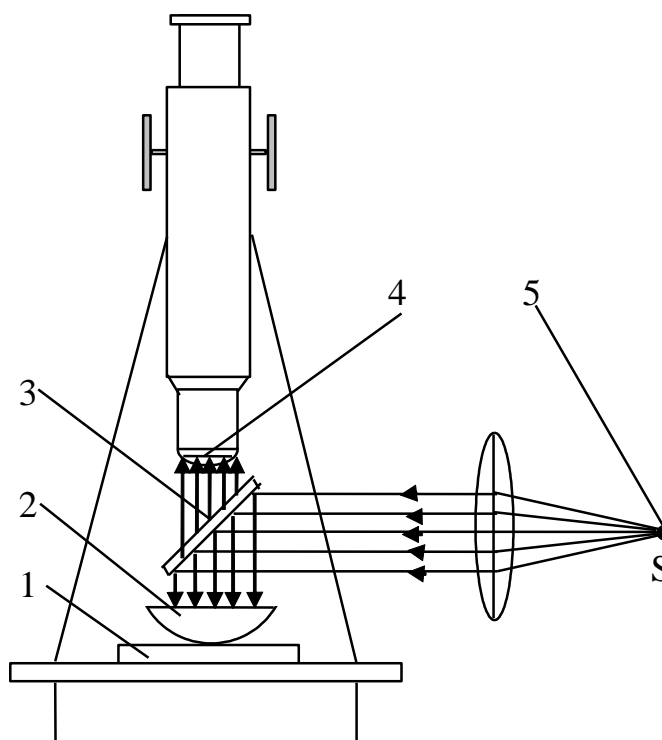


Рис. 3.25

Из схемы установки можно получить связь оптической разности δ с радиусом колец Ньютона ρ и радиусом линзы R . Затем, используя условия максимума (3.47) света при интерференции, вывести формулу для определения радиусов светлых колец Ньютона

$$\rho_k^2 = (2k + 1)R \frac{\lambda}{2} \quad (3.49)$$

Аналогично из условия минимума света (3.48) следует формула радиусов темных колец

$$\rho_k^2 = kR\lambda. \quad (3.50)$$

В формулах (3.49) и (3.50) k – порядковый номер кольца ($k = 0$ соответствует центральному темному пятну).

Измерив, например, радиусы двух темных колец, достаточно удаленных от центрального темного пятна:

$$\rho_{k_1}^2 = k_1 R \lambda; \quad \rho_{k_2}^2 = k_2 R \lambda,$$

можно получить

$$\rho_{k_2}^2 - \rho_{k_1}^2 = R\lambda(k_2 - k_1)$$

и определить радиус линзы

$$R = \frac{(\rho_{k_2} - \rho_{k_1})(\rho_{k_1} + \rho_{k_2})}{\lambda(k_2 - k_1)} \quad (3.51)$$

Вычисление R по радиусам двух колец Ньютона снижает погрешность измерения.

Экспериментальная установка

Диаметр колец измеряют при помощи микроскопа (рис.3.25).

На объективе микроскопа имеется насадка 3 со стеклянной пластинкой (под углом $\alpha = 45^\circ$ к оси микроскопа). Она направляет горизонтальный пучок света от источника света 5 на столик микроскопа, на котором на плоскопараллельной пластинке из черного стекла 1 находится плоско-выпуклая линза 2 большого радиуса кривизны.

Для измерения диаметра колец следует определить цену деления a_0 на шкале окуляра.

Пусть N делений масштабной линейки, рассматриваемой в микроскоп, совпадают с N_0 делениями окулярной шкалы. Тогда

$$Na = N_0 a_0; \quad a_0 = a \frac{N}{N_0}, \quad (3.52)$$

Здесь $a = 10^{-2}$ см – цена деления масштабной линейки.

В качестве источника монохроматического света используется лампа с красным светофильтром $\lambda = \text{Å}$ ($1 \text{ Å} = 10^{-8}$ см).

Порядок выполнения работы

Упражнение 1

Калибровка окулярной шкалы микроскопа.

1. Осветить предметный столик микроскопа.
2. Поместить на столик микроскопа масштабную линейку, цена деления которой a известна ($a = 10^{-2}$ см).
3. Перемещением тубуса микроскопа добиться ясной видимости шкалы масштабной линейки.
4. Вращением масштабной линейки добиться ее совмещения с масштабом окуляра. По формуле (3.52) рассчитать цену деления a_0 шкалы окуляра.
5. Убрать масштабную линейку с предметного столика микроскопа.

Упражнение 2

Определение радиуса кривизны линзы.

1. Поместить на столик микроскопа плоскопараллельную пластинку из черного стекла блестящей стороной вверх.
2. Включить лампу.
3. На пластинку поместить линзу выпуклой стороной вниз, стараясь, чтобы ее ось совпала с осью объектива микроскопа.
4. Перемещением тубуса микроскопа добиться видимости колец Ньютона в окуляре микроскопа. Аккуратным перемещением линзы добиться совпадения центрального темного пятна интерференционной картины с центром поля зрения микроскопа.

5. Измерить расстояние 2ρ между внешним и внутренним краями достаточно удаленного от центра темного кольца с номером k_1 (например, $k_1 = 3$), как показано на рис.3.26. ($k = 0$ – центральное темное кольцо). То же измерение проделать для темного кольца с номером k_2 . Полученные результаты занести в табл. 3.13 (1 измерение).

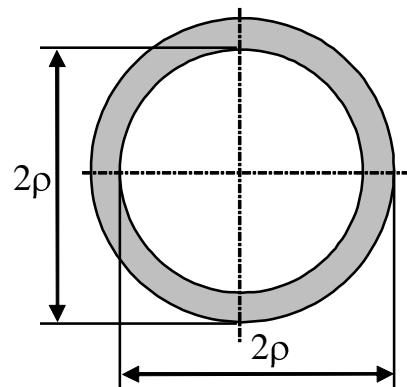


Рис. 3.26

Таблица 3.13

Темные кольца

Номера колец	2ρ (дел)		ρ (дел)		$\bar{\rho}$ дел.	$\bar{\rho}$ см	R_1 см
	1 измер.	2 измер.	1 измер.	2 измер.			
$k_1 =$							
$k_2 =$							

6. Повернуть пластинку с линзой на 90° и повторить измерения по п.5 (для тех же колец).

7. Найти средние значения радиусов обоих темных колец $\bar{\rho}$ в делениях шкалы. Рассчитать $\bar{\rho}$ в сантиметрах с учетом цены деления шкалы окуляра a_0 :

$$\bar{\rho}(\text{см}) = \bar{\rho}(\text{дел.}) \cdot a_0.$$

8. По формуле (3.51) определить радиус кривизны линзы R_1 , подставляя средние значения радиусов колец.

9. Аналогичные измерения и расчеты проделать для двух светлых колец, заносая их в табл.3.14, и подсчитать R_2 .

Таблица 3.14

Светлые кольца

Номера колец	2ρ (дел)		ρ (дел)		$\bar{\rho}$ дел	$\bar{\rho}$ см	R_2 см
	1 измер.	2 измер.	1 измер.	2 измер.			
$k_1 =$							
$k_2 =$							

10. Определить среднеарифметическое значение \bar{R} для темных и светлых колец

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2}{2}.$$

11. Отключить установку от сети.

Контрольные вопросы

1. Какие волны называются когерентными?
2. Что такое оптическая длина пути и разность хода двух лучей?
3. В чем заключается условие максимума и минимума интенсивности света при интерференции лучей?
4. Приведите формулы для радиусов темных и светлых колец Ньютона.
5. Опишите методику, используемую в работе для определения радиуса кривизны линзы.
6. Как в работе производится калибровка окулярной шкалы микроскопа?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 114

Изучение дифракционного спектра и определение длины световой волны

Цель работы: определение длин световых волн; расчет угловой дисперсии и разрешающей способности дифракционной решетки.

Краткая теория

Одномерная дифракционная решетка для проходящего света представляет собой совокупность большого числа щелей шириной b , разделенных непрозрачными промежутками шириной a . (рис.3.27).

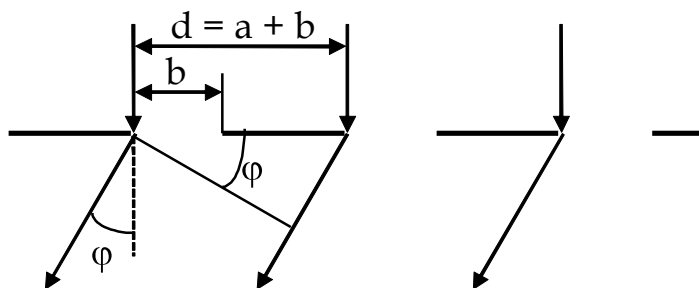


Рис. 3.27

Величина $d = (a + b)$, равная расстоянию между двумя соседними щелями называется постоянной решетки. Она связана с числом щелей n , приходящихся на единицу ширины решетки

$$(a + b) = 1/n. \quad (3.53)$$

При прохождении монохроматического света через дифракционную решетку наблюдается дифракционная картина, представляющая собой чередование светлых и темных полос, соответствующим условиям максимума и минимума света.

Если свет на решетку падает нормально к ее поверхности, то *главные максимумы* света при дифракции определяются условием

$$(a + b) \sin \varphi = k\lambda; \quad (3.54)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – порядок максимума, φ – угол дифракции, под которым наблюдается рассматриваемый максимум, λ – длина волны падающего на решетку света.

Если на дифракционную решетку падает не монохроматический свет, то условия минимумов и максимумов выполняются для каждой длины волны под разными углами. Получается дифракционный спектр.

Различают две главные характеристики дифракционной решетки, как спектрального прибора:

1) Разрешающая способность дифракционной решетки:

$$R = \frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda} = kN. \quad (3.55)$$

Здесь $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ – интервал длин волн, разрешаемых данной решеткой в спектре k -го порядка, $\bar{\lambda}$ – среднее арифметическое λ_1 и λ_2 , N – число освещенных штрихов решетки, k – порядок спектра, в котором линии разрешены.

Разрешенными (видимыми отдельно) являются две линии у которых максимум одной совпадает с минимумом другой. На рис.3.28 показано распределение интенсивности света J для двух линий близких длин волн λ_1 и λ_2 .

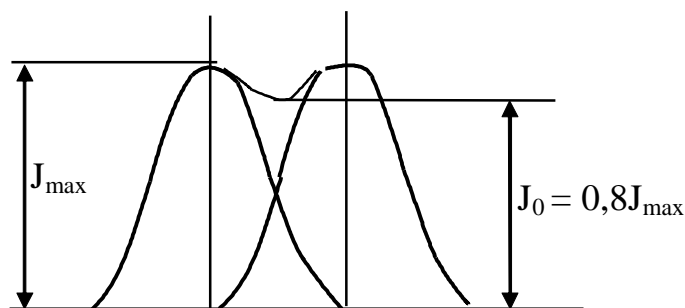


Рис. 3.28

2) Угловая дисперсия решетки:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (3.56)$$

Продифференцировав условие главных максимумов для решетки (3.54), можно получить

$$D_\varphi = \frac{k}{(a + b) \cos \varphi}. \quad (3.57)$$

Если угол φ мал, выражение (3.57) можно записать в виде

$$D_\varphi \approx \frac{k}{a + b}. \quad (3.58)$$

Методика измерений

Выражение для главных максимумов на дифракционной решетке (3.54) дает возможность по известному периоду дифракционной решетки $(a + b)$ и экспериментально измеренному углу φ вычислить длину волны, соответствующей данной линии спектра

$$\lambda = \frac{(a + b) \sin \varphi}{k}. \quad (3.59)$$

По измеренным длинам волн для двух линий одного порядка k можно определить значение угловой дисперсии в соответствии с формулой (3.56)

$$D_{\varphi} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}, \quad (3.60)$$

где $\Delta \lambda$ – разность длин волн линий, $\Delta \varphi$ – разность соответствующих этим линиям углов.

Также, зная число освещенных штрихов N , можно по формуле (3.55) экспериментально оценить разрешающую способность R решетки.

Экспериментальная установка

Для изучения спектра и точного определения углов отклонения спектральных линий применяются спектрометры (рис.3.29).

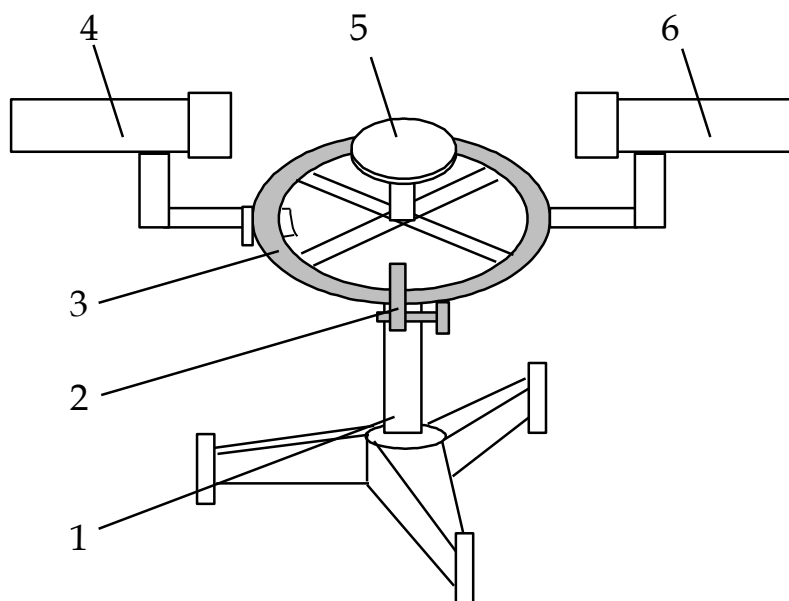


Рис. 3.29

Спектрометр состоит из штатива 1, на котором закреплены: горизонтальное кольцо 3, снабженное лимбом, и столик 5 для установки дифракционной решетки. Над столиком расположена горизонтальная зрительная труба 4, вращающаяся вместе с лимбусом вокруг вертикальной оси, проходящей через центр столика.

На одном уровне с трубой имеется неподвижный коллиматор δ с линзами и узкой щелью, обращенной к источнику света. Источником света в данной работе служит ртутная лампа. Ширину щели коллиматора можно регулировать.

Окуляр зрительной трубы имеет вертикальную нить для визирования на щель коллиматора. Если оси зрительной трубы и коллиматора совпадают, то при освещении щели белым светом в окуляре наблюдается белая линия (центральный максимум с $k = 0$).

Измерение углов дифракции осуществляется следующим образом. Зрительная труба поворачивается вправо и влево от центрального максимума (см. рис.3.30) и наводится на соответствующие линии в спектре одного порядка.

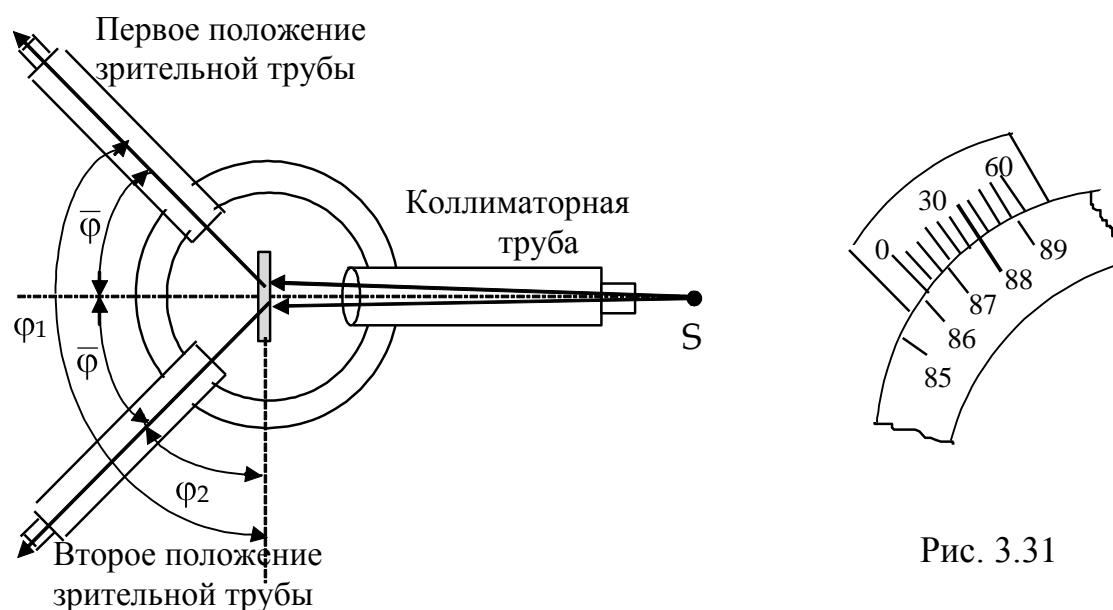


Рис. 3.31

Рис. 3.30

По указателю производится отсчет углов φ_1 и φ_2 .

Из рис.3.30 видно, что среднее значение угла дифракции $\bar{\varphi}$ может быть рассчитано по разности двух отсчетов:

$$\bar{\varphi} = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{2}. \quad (3.61)$$

Измерения углов проводятся следующим образом. Целое число градусов определяется по значению на лимбе кругового кольца перед нулевым делением нониуса. Затем измеряется число делений нониуса до совпадающих рисок на шкалах лимба и нониуса. Цена каждого деления нониуса δ' .

На рис.3.31 показан пример измерения для угла $\varphi_1 = 86^\circ + \delta_{\text{дел}} \cdot \delta' = 86^\circ 36'$.

Порядок выполнения работы

1. Осветить щель коллиматора ртутной лампой.
2. Окуляр зрительной трубы сфокусировать на вертикальную нить так, чтобы она была отчетливо видна.
3. Установить зрительную трубу на одной прямой с коллиматором и наблюдать изображение щели.
4. Поставить на столик решетку.
5. Повернуть зрительную трубу влево и вправо от центральной линии и измерить угловое расположение φ_1 и φ_2 спектральных линий разных цветов (фиолетовые, синие, зеленые и желтые) в трех первых спектрах ($k = 1, 2, 3$). Результаты измерений занести в табл.3.15.

Таблица 3.15

k	Цвет линии	φ_1 вправо от центральной линии	φ_2 влево от центральной линии	$\bar{\varphi}$	$\sin \bar{\varphi}$	λ м
1	Синий					
	Зеленый					
	Желтый					
2	Синий					
	Зеленый					
	Желтый					
3	Синий					
	Зеленый					
	Желтый					

6. Для каждой линии подсчитать среднее отклонение от центральной линии $\bar{\varphi}$ по формуле (3.61).

7. Подсчитать значения $\sin \bar{\varphi}$ и по формуле (3.59) определить длины волн λ . Период решетки ($a + b$) рассчитать по известному числу штрихов n на единицу длины решетки по формуле (3.53)

8. Найти $\bar{\lambda}$ – средние значения длин волн соответствующих цветов:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{\text{синий}} &= \\ \bar{\lambda}_{\text{зеленый}} &= \\ \bar{\lambda}_{\text{желтый}} &= \end{aligned}$$

9. Взяв измеренные длины волн λ и значения $\bar{\varphi}$ для двух линий одного порядка по формуле (3.60) определить экспериментальное значение угловой дисперсии $D_{\varphi_{\text{эксп.}}}$. Сравнить полученный результат

со значением $D_{\varphi_{\text{теор.}}}$, рассчитанным по формуле (3.58). Результаты расчетов занести в табл.3.16.

Таблица 3.16

k	$D_{\varphi_{\text{эксп.}}}$ рад/м	$D_{\varphi_{\text{теор.}}}$ рад/м	$L_{\text{осв.}}$ м	N —	R —

10. Измерить линейкой освещенную ширину решетки $L_{\text{осв.}}$ и определить число освещенных штрихов:

$$N = \frac{L_{\text{осв.}}}{(a + b)}.$$

11. По формуле (3.55)

$$R = kN$$

оценить разрешающую способность решетки для одного из порядков спектра.

12. Отключить лампу от сети.

Контрольные вопросы

1. Дифракционная решетка. Условие главных максимумов.
2. Разрешающая способность и угловая дисперсия дифракционной решетки.
3. Основные элементы устройства спектрометра.
4. Как производится отсчет углов дифракции в работе?
5. Как экспериментально оценить угловую дисперсию и разрешающую способность дифракционной решетки?
6. Как зависят угловая дисперсия и разрешающая способность решетки от порядка наблюдаемого спектра?

РАЗДЕЛ 4

Образ природы в неклассическом естествознании

4.1. Квантовая концепция в неклассической физике

Первым этапом в развитии неклассической квантовой физики явилось введенное в начале XX века понятие о квантах света. Изучение взаимодействия света с веществом показало, что у света помимо волновых свойств есть и другие свойства, которые присущи частицам, обладающим массой, импульсом, энергией. Согласно современным представлениям, свет обладает квантово-волновым дуализмом, т.е. представляет собой одновременно и волну, и поток частиц – фотонов. Рассмотрим подробнее некоторые явления, в которых проявляется квантовая природа света.

Тепловое излучение тел

Одним из первых явлений, которые не поддавались объяснению с точки зрения классической физики, было тепловое излучение тел. Все тела, независимо от их химического состава, при любой, отличной от абсолютного нуля температуре, являются источниками *электромагнитного теплового излучения*.

Основные характеристики теплового излучения.

Энергетическая светимость тела M_e [Вт/м²] – количество энергии, излучаемой за единицу времени по всем направлениям с единицы площади поверхности тела во всем диапазоне длин волн.

Излучение состоит из волн с различной длиной волны λ . Распределение энергии в спектре по длинам волн характеризуется с помощью спектральной плотности энергетической светимости $M_{\lambda,T}$.

Спектральная плотность энергетической светимости $M_{\lambda,T}$ [Вт/м³] – количество энергии, излучаемой за единицу времени по всем направлениям с единицы площади поверхности тела в единичном диапазоне длин волн.

Энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости связаны следующим образом

$$M_{\lambda,T} = \frac{dM_e}{d\lambda}; \quad \text{или} \quad M_e = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T} d\lambda \quad (4.1)$$

Для анализа закономерностей теплового излучения в физике вводится понятие **абсолютно черного тела**: *тело, которое поглощает все падающее на него излучение*. Моделью абсолютно черного тела может являться замкнутая полость с маленьким отверстием (рис.4.1). Всякий луч, попавший внутрь полости через отверстие, испытывает

многократное отражение, пока вся энергия луча не поглотится стенками полости.

К концу XIX века был экспериментально исследован спектр излучения абсолютно черного тела. Распределение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела по длинам волн излучения показано на рис.4.2.

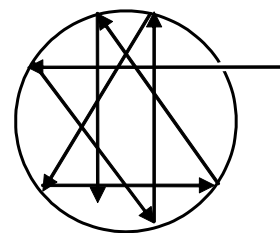


Рис. 4.1

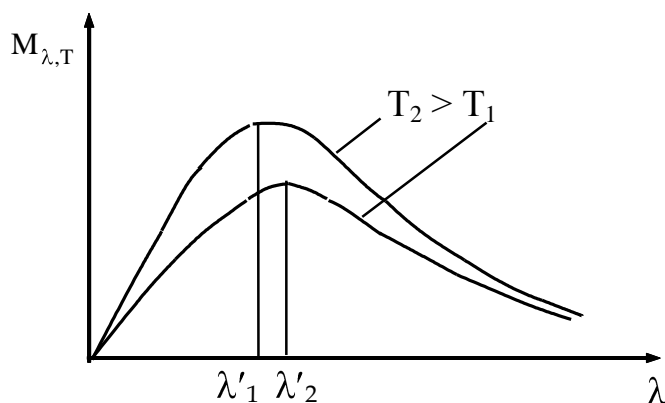


Рис. 4.2

Из обобщения экспериментальных данных получены два основных закона излучения абсолютно черного тела:

1. Как следует из рис.4.2, для каждой температуры существует длина волны λ' , на которую приходится максимум излучения. При увеличении температуры этот максимум сдвигается в сторону меньших длин волн, что соответствует экспериментально полученному **закону Вина**: *длина волны λ' , на которую приходится максимум излучения в спектре абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре*:

$$\lambda' = \frac{b}{T}, \quad (4.2)$$

где $b = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина, T – абсолютная температура.

2. Интенсивность излучения увеличивается с температурой. Эта закономерность описывается **законом Стефана-Больцмана**: *энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры*:

$$M_e = \sigma T^4, \quad (4.3)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, индекс «0» соответствует абсолютно черному телу.

Попытки теоретического описания теплового излучения с точки зрения классической волновой теории, законов термодинамики и статистической физики не имели успеха.

Тогда в 1900 году немецкий физик Макс Планк предложил революционную гипотезу – *постулат Планка*: тела могут излучать электромагнитную энергию порциями (квантами), причем энергия одного кванта пропорциональна частоте излучения ν

$$\varepsilon = h\nu, \quad (4.4)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

На основе этого утверждения была получена формула, описывающая полученные экспериментальные зависимости, называемая формулой Планка для теплового излучения тел. Из этой формулы можно вывести и представленные выше экспериментальные законы Вина (4.2) и Стефана-Больцмана (4.3).

Изучению законов теплового излучения тел посвящена лабораторная работа № 120.

Внешний фотоэффект

Квантовая гипотеза послужила основой для объяснения явления внешнего фотоэффекта. Внешний фотоэффект заключается в испускании электронов поверхностью металла при ее освещении.

В вакуумном фотоэлементе (см. рис. 4.3) свет падает на поверхность металла, являющегося катодом (К). В результате поглощения фотона электрон приобретает энергию и может вырваться с поверхности металла. Вылетевшие фотоэлектроны ускоряются электрическим полем и достигают анода (А), таким образом, по цепи идет ток.

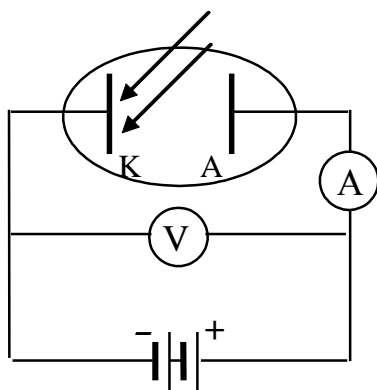


Рис. 4.3

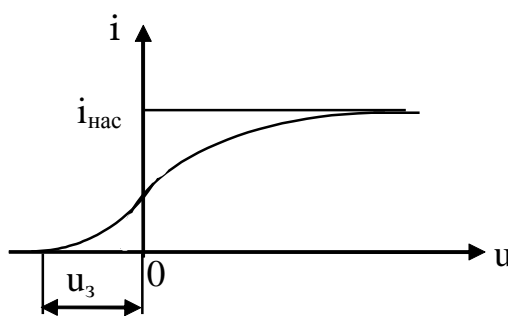


Рис. 4.4

Зависимость тока в фотоэлементе от приложенного напряжения, называемая вольт - амперной характеристикой, показана на рис. 4.4.

Как видно из приведенной зависимости, даже при нулевой разности потенциалов между катодом и анодом существует ток, так как некоторые электроны, выбитые светом с катода, обладают достаточной энергией, чтобы достигнуть анода. При увеличении напряжения все большее число фотоэлектронов достигает анода, пока

все вырванные светом электроны не попадут на анод, при этом ток в вакуумном фотоэлементе достигает насыщения.

Законы фотоэффекта:

1) Количество вырванных светом электронов пропорционально интенсивности света. Чем больше интенсивность света, тем больше испускается электронов, следовательно, тем больше ток насыщения этого фотоэлемента.

2) Максимальная скорость v_{\max} , которую имеет электрон на вылете из катода, зависит только от частоты света.

3) Для каждого вещества существует граничная максимальная длина волны $\lambda_{\text{гр}}$, выше которой фотоэффект не наблюдается. Эта граничная длина волны называется *красной границей фотоэффекта*.

Уравнения для описания этих закономерностей теоретически получил А. Эйнштейн, развив гипотезу Планка и предположив, что свет не только излучается, но и поглощается квантами. Т.е. свет представляет собой поток особых частиц – фотонов, каждый из которых обладает квантом энергии и распространяется со скоростью света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

За эту работу и труды в области математической физики Эйнштейну в 1921 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта имеет вид

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (4.5)$$

где ε – энергия поглощенного фотона, $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из вещества, $mv_{\max}^2/2$ – максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона.

Из этого уравнения следует, что фотоэффект будет наблюдаться при условии $\varepsilon \geq A_{\text{вых}}$.

Исходя из этого условия, можно получить выражение для красной границы фотоэффекта. Учитывая связь частоты света с его длиной волны

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (4.6)$$

постулат Планка (4.4) можно записать в виде

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}. \quad (4.7)$$

Тогда для красной границы фотоэффекта получаем

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}. \quad (4.8)$$

Исследованию закономерностей внешнего фотоэффекта посвящена лабораторная работа № 122.

После изучения явлений теплового излучения и фотоэффекта перед физиками встал вопрос о взаимном соответствии учений о квантовой и волновой природе света. Напомним, что волновая природа света ранее была экспериментально подтверждена в целом ряде явлений оптики (интерференция, дифракция и т.д.).

В результате утвердилось понимание света как совершенно необычного для классической физики физического явления – в нем сочетаются свойства потока частиц (корпускул, обладающих определенной энергией и импульсом) и волнового процесса (характеризуемого длиной волны и частотой).

Это неразрывное единство принципиально различных свойств стали называть *корпускулярно-волновым дуализмом света*.

4.2. Квантовая физика и развитие современной цивилизации

Позже в неклассической физике идея дискретности, *квантования* физических характеристик микрообъектов получила дальнейшее развитие. В настоящее время эта идея лежит в основе целой науки – *квантовой физики*, которая дала возможность теоретически объяснить, например, строение и свойства атомов, закономерности ядерных взаимодействий и т.д.

Постоянную Планка стали рассматривать как величину, определяющую масштаб изменения квантовых характеристик микрообъектов, как своеобразную порцию воздействия в микромире. Поэтому часто постоянную Планка называют еще *квантом действия*.

Один из методов экспериментального определения этой постоянной изучается лабораторной работе № 127.

Описание микрообъектов в квантовой механике неоднозначное, вероятностное. ***Именно этот вероятностный, статистический характер закономерностей квантово-механического описания явлений ознаменовал переход от эпохи классического естествознания к неклассическому.***

Главное отличие *статистических* законов от *динамических* – в учете случайного. В динамических законах действительность огрублена, хотя в области применимости этих законов последствия этого огрубления практически не заметны.

Законы динамического типа в чистом виде не существуют, а проявляются лишь там, где можно пренебречь малой непредсказуемостью. *Фундаментальностью же обладают только статистические законы.*

В громадном перечне технических и технологических применений квантовой физики следует особо выделить такие направления, как ядерная энергетика; лазеры; полупроводники, микро- и нанотехнологии.

Физика полупроводников

Квантовая механика объяснила поведение электронов не только в атомах, но и в твердых телах – кристаллах. Важнейшим свойством полупроводниковых кристаллов является зависимость их электропроводности от температуры, освещенности, внешнего магнитного поля и давления. Это позволяет использовать полупроводники для создания эффективных датчиков, реагирующих на различные воздействия.

При повышении температуры полупроводника его удельное электросопротивление уменьшается (см. рис. 4.5), так как электроны отрываются от своих атомов и начинают свободно перемещаться по всему объему кристалла. На месте электрона остается вакантное место – дырка, на которое могут переходить электроны соседних атомов. Следовательно, в чистом полупроводнике носителями заряда являются электроны «-» и дырки «+».

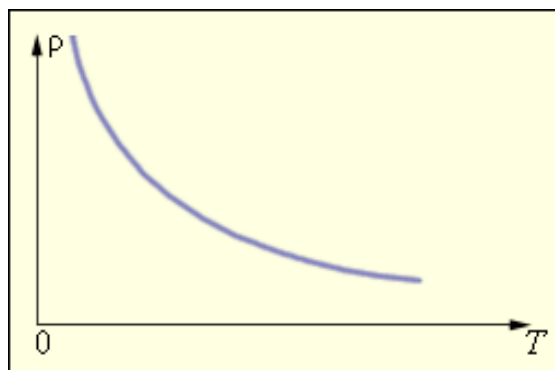


Рис. 4.5

На свойства полупроводника сильно влияют примеси различных элементов.

Полупроводник n-типа образуется при добавлении в виде примеси элемента с валентностью на единицу большую (например, как показано на рис. 4.6, если в четырехвалентный германий Ge добавить 5-ти валентный фосфор P). В этом случае образуется избыток электронов, которые уже при комнатной температуре могут свободно перемещаться и создавать ток. Следовательно, в полупроводнике n-типа основными носителями заряда являются электроны.

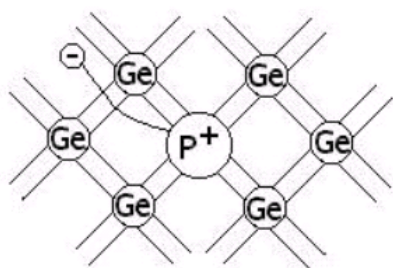


Рис. 4.6

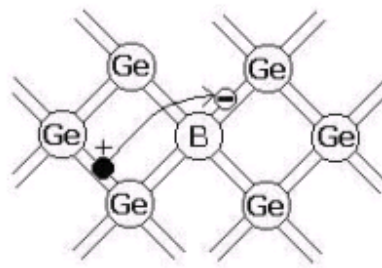


Рис. 4.7

Полупроводник p – типа образуется при добавлении примеси с валентностью на единицу меньше основного элемента (например, если в 4-х валентный полупроводник германий Ge добавить 3-х валентный бор В, как показано на рис.4.7). Тогда образуются дополнительные вакантные места – дырки, которые также могут перемещаться по объему кристалла. *В полупроводнике p-типа дырки являются основными носителями заряда.*

Современные технологии позволяют в пределах единого полупроводникового кристалла получать области n– и p– типа. Граница раздела между этими областями называется p–n переходом, который является основой создания различных полупроводниковых приборов и полупроводниковых интегральных микросхем.

Так полупроводниковый диод (выпрямитель тока) содержит один p–n переход, транзистор – два p–n перехода. В солнечной батарее p–n переходы превращают световую энергию в электрическую. В светодиодах и полупроводниковых лазерах идут обратные процессы.

Изучению полупроводниковых устройств (диода, фотоэлемента, фотосопротивления и т.д.) посвящены лабораторные работы №№ 132, 136/137, 170.

В настоящее время активно развивается микроэлектроника – технология создания электронных устройств на основе интегральных микросхем. Уровень, достигнутый микроэлектроникой, позволяет создавать более 100 миллионов элементов на 1 см² кристалла. При этом характерные размеры элементов микросхемы – это десятые доли микрометра.

Интегральные схемы являются элементной базой современной компьютерной техники, а, следовательно, технической базой *информационных технологий*. Развивается следующий этап микротехнологий – наноэлектроника, то есть создание микросхем, размеры которых измеряются нанометрами (10⁻⁹ м). На этом этапе управление структурой кристалла должно реализоваться на уровне отдельных атомных слоев и индивидуальных атомов.

Вопросы по разделу 4

1. Что такое тепловое излучение тел? Дайте определение энергетической светимости и спектральной плотности энергетической светимости тела.
2. Изобразите спектр излучения абсолютно черного тела.
3. Сформулируйте законы теплового излучения для абсолютно черного тела.
4. В чем заключаются гипотеза и постулат Планка?
5. Дайте определение явлению внешнего фотоэффекта.

6. Объясните вольт–амперную характеристику вакуумного фотоэлемента.
7. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
8. Напишите и объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
9. Что такое красная граница фотоэффекта, как ее можно определить?
10. В чем заключается квантово-волновой дуализм света.
11. В чем физический смысл постоянной Планка?
12. Каково основное отличие фундаментальных законов микромира от динамических закономерностей?
13. Как зависит электросопротивление полупроводников от температуры? Что является носителями тока в чистом полупроводнике?
14. Как влияют примеси на свойства полупроводников? Что такое полупроводники p- и n-типа?
15. Охарактеризуйте основные области применения полупроводников в современной цивилизации.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 120

Исследование излучения абсолютно черного тела

Цель работы: проверка закона Стефана – Больцмана для энергетической светимости абсолютно черного тела.

Методика измерений

В данной работе исследуется зависимость энергетической светимости M_e модели абсолютно черного тела от температуры, которая выражается законом Стефана – Больцмана (4.3):

$$M_e = \sigma T^4, \quad (4.9)$$

т.е. энергетическая светимость M_e пропорциональна абсолютной температуре тела в четвертой степени.

Моделью абсолютно черного тела может служить печь с небольшим отверстием. Напротив отверстия помещается измерительный прибор, ток i в цепи которого пропорционален мощности падающего на него излучения, которая, в свою очередь, пропорциональна энергетической светимости M_e излучения, исходящего из отверстия печи. Исходя из этого, можно записать

$$i = kM_e, \quad (4.10)$$

где k - коэффициент пропорциональности.

Подставляя M_e^o из закона Стефана - Больцмана (4.9), получаем:

$$i = k\sigma T^4.$$

Логарифмируя это выражение, имеем

$$\ln i = \ln k + \ln \sigma + 4 \ln T. \quad (4.11)$$

Заменяем

$$\ln k + \ln \sigma = \text{const}$$

и окончательно записываем

$$\ln i = 4 \ln T + \text{const}. \quad (4.12)$$

Из выражения (4.12) следует, что зависимость $\ln i$ от $\ln T$ изображается прямой линией с угловым коэффициентом, близким к 4.

Экспериментальная установка

Для изучения излучения абсолютно черного тела предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.4.8.

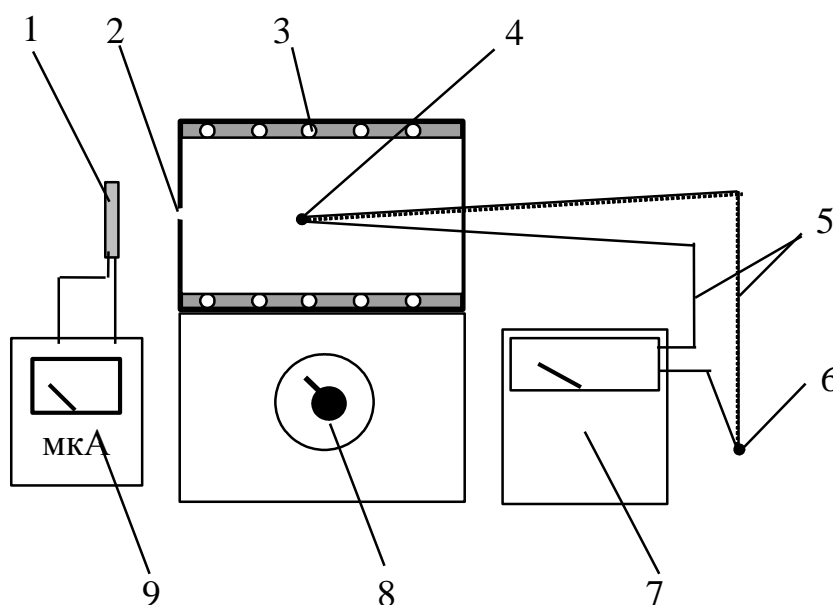


Рис. 4.8

Моделью абсолютно черного тела служит электрическая печь с маленьким отверстием 2. Нагрев печи осуществляется нагревательной спиралью 3. Степень нагрева можно изменять с помощью рукоятки 8. При крайнем левом положении рукоятки 8 мощность нагревательной спирали минимальна, при повороте рукоятки по часовой стрелке мощность нагрева возрастает.

Для измерения температуры в печи в нее помещается термопара 5. Термопара представляет собой две проволочки из разных материалов, которые спаяны с двух концов. Один спай 4 находится в печи, другой спай 6 – в комнате. Если температуры спаев различны, то по термопаре будет течь ток, пропорциональный разности температур спаев (разности температур в печи и в комнате).

Эта разность температур измеряется стрелочным прибором 7, подключенным к термопаре 5. Для определения абсолютной температуры T в печи к показанию прибора t_1 нужно прибавить температуру t_2 холодного спая (которая измеряется термометром в комнате) и выразить результат в абсолютной шкале:

$$T = t_1 + t_2 + 273[\text{K}]. \quad (4.13)$$

Напротив отверстия печи устанавливается термостолбик 1, который представляет собой несколько термопар, соединенных последовательно. Один ряд спаев (например, нечетный) нагревается под действием излучения из отверстия печи, другой ряд спаев защищен от действия излучения диафрагмой.

Ток i , протекающий через термостолбик **пропорционален энергетической светимости печи**. Величина этого тока измеряется с помощью микроамперметра 9.

Порядок выполнения работы

1. Открыв щель термостолбика 1, установить его на расстоянии 2 – 3 см от отверстия печи так, чтобы оси диафрагмы термостолбика и отверстия печи совпадали.

2. Повернуть рукоятку 8 в положение 1 и подключить печь к электросети (220 В).

3. Примерно через $\tau = 10$ мин, когда в печи установится состояние, близкое к равновесному, с температурой $t_1 = 300^\circ\text{C}$ (по показаниям стрелочного прибора) записать в табл.4.1 значение тока i по микроамперметру 9.

Таблица 4.1

№ п.п.	t_1 $^\circ\text{C}$	t_2 $^\circ\text{C}$	T К	$\ln T$ –	i мкА	$\ln i$ –
1	300					
2	400					
3	500					
4	600					
5	700					

4. Постепенно повышать температуру печи, последовательно (после очередного измерения) поворачивая рукоятку 8 в положения 2, 3 и т.д. По мере нагрева через каждые 100°C записывать показания микроамперметра в табл.4.1.

5. По достижении температуры $t_1 = 700^\circ\text{C}$ снять последнее значение тока по микроамперметру и **выключить** печь из электросети. Повернуть рукоятку 8 в положение 0.

6. Записать значение температуры t_2 по термометру в комнате.

7. Рассчитать значения абсолютной температуры в печи по формуле (4.13).

10. Рассчитать значения $\ln T$ и $\ln i$. Построить график зависимости $\ln i = f(\ln T)$. По графику выбрать две произвольные точки 1 и 2 и определить угловой коэффициент полученного графика по формуле

$$k = \frac{\ln i_2 - \ln i_1}{\ln T_2 - \ln T_1}.$$

10. Сравнить значение k с теоретическим коэффициентом из закона Стефана – Больцмана, равным 4 (см. формулу (4.9)), и рассчитать относительную погрешность измерения:

$$\delta = \frac{4 - k}{4} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.
2. Что в данной работе является моделью абсолютно черного тела?
3. Каким образом в данной работе исследуется энергетическая светимость печи?
4. Что такое термопара и термостолбик?
5. Как определить абсолютное значение температуры печи?
6. Каким образом в работе осуществляется экспериментальная проверка закона Стефана – Больцмана?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 122

Изучение внешнего фотоэффекта

Цель работы: изучение некоторых закономерностей внешнего фотоэффекта и построение вольт–амперной характеристики вакуумного фотоэлемента.

Методика измерений и экспериментальная установка

Для изучения внешнего фотоэффекта предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.4.9.

Источник света (лампа в кожухе) 3 и вакуумный фотоэлемент 1 размещены на оптической скамье 2. Перемещая фотоэлемент, по оптической оси можно устанавливать различные расстояния между источником света и фотоэлементом.

В цепь установки включены вольтметр 5, микроамперметр 6 и переменное сопротивление, регулируя которое с помощью ручки 4 изменяют напряжение на фотоэлементе.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку в сеть напряжением $u = 220$ В.

2. Установить фотоэлемент 1 на некотором расстоянии d в диапазоне $(0,2-0,7)$ м от источника света и открыть крышку фотоэлемента.

3. Снять вольт-амперную характеристику фотоэлемента. Для этого, повышая напряжение, через каждые 10 В отмечать в табл.4.2 значения фототока. Измерения производить до величины тока насыщения $i_{\text{нас}}$.

Рис. 4.9

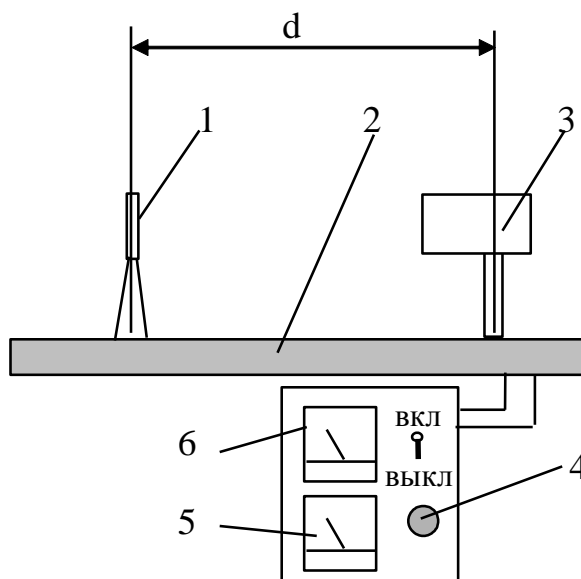


Таблица 4.2

№ п.п	u В	d = ___ м	d = ___ м	d = ___ м	d = ___ м	d = ___ м
		i мкА	i мкА	i мкА	i мкА	i мкА
1	10					
2	20					
3	30					
4	40					
5	50					
6	60					
7	70					
8	80					
9	90					
10	100					

4. Повторить измерения по п.3 для четырех других расстояний между источником света и фотоэлементом в диапазоне $0,2 - 0,7$ м и записать полученные результаты в табл.4.2.

5. Выключить установку из сети и закрыть крышку фотоэлемента.

6. Построить на одном графике полученные вольт-амперные характеристики фотоэлемента $i = f(u)$.

7. По данным табл.4.2 заполнить табл.4.3 и построить график зависимости тока насыщения $i_{\text{нас}}$ от величины $1/d^2$.

Таблица 4.3

№ п.п	d м	$1/d^2$ м^{-2}	$i_{\text{нас}}$ мкА
1			
2			
3			
4			
5			

Контрольные вопросы

1. Что называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента, каковы ее закономерности?
2. Как в работе изменяют напряжение на вакуумном фотоэлементе?
3. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
4. Объясните полученные в работе вольт–амперные характеристики.
5. На основе законов фотоэффекта объясните, почему зависимость тока насыщения $i_{\text{нас}}$ от величины $1/d^2$ изображается прямой линией.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 127

Определение постоянной Планка

Цель работы: по спектру поглощения двухромовокислого калия рассчитать значение постоянной Планка.

Краткая теория

Спектры излучения тел могут иметь различный вид: линейчатые спектры, полосатые и сплошные.

Линейчатый спектр излучают обычно отдельные атомы, например гелий и неон в газоразрядных трубках, а также пары металлов натрия и ртути в натриевых и ртутных лампах.

Полосатые спектры испускаются молекулами. Излучение газов в тлеющем электрическом разряде, свечение жидкостей представляет собой полосатые спектры. Полоса состоит из ряда близко расположенных спектральных линий. Излучение полосатых спектров происходит вследствие усложнения энергетических состояний молекулы по сравнению с состоянием изолированного атома в связи с колебательным и вращательным движением составляющих ее ядер.

Сплошной спектр испускается твердыми телами, например раскаленным волоском лампочки накаливания. Непрерывный характер спектра вытекает из сильного взаимодействия частиц, составляющих твердое тело.

Если свет сплошного спектра, например солнечный, пропустить через разреженный газ, то в спектре появятся узкие темные линии, возникающие вследствие поглощения газом отдельных частот – именно тех, которые газ сам способен испускать. Это – линейчатый спектр поглощения.

В спектрах поглощения большинства жидких и твердых тел имеются полосы поглощения. Если же данное вещество полностью поглощает все частоты падающего света, то спектр поглощения называется сплошным.

Методика измерений

Если раствор двухромовокислого калия $K_2Cr_2O_7$ освещать светом, то при поглощении света раствором происходит распад иона Cr_2O_7 . Распад происходит, если иону Cr_2O_7 сообщается энергия не менее $3,97 \cdot 10^{-19}$ Дж. Следовательно, поглощаются фотоны, энергия которых $\varepsilon = h\nu$ больше или равна приведенного граничного значения

$$h\nu \geq 3,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \quad (4.14)$$

Используя связь частоты фотона ν с длиной волны λ (4.6)

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, получаем

$$\frac{hc}{\lambda} \geq 3,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \quad (4.15)$$

Граничное (максимальное) значение длины волны поглощенного света $\lambda_{гр}$ может быть найдено по спектру поглощения раствора $K_2Cr_2O_7$. По этому значению из формулы (4.15) может быть экспериментально определена постоянная Планка

$$h = \frac{3,97 \cdot 10^{-19}}{c} \lambda_{гр} \quad [\text{Дж} \cdot \text{с}] \quad (4.16)$$

Экспериментальная установка

Для экспериментального определения постоянной Планка предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.4.10.

В установку входят две лампы: ртутно–кварцевая 1 и обычная лампа накаливания 2, которые зажигаются переключателем 8. Лампы

могут поочередно устанавливаться перед коллиматорной трубой 4 спектрокопа 6 с помощью поворотного кронштейна.

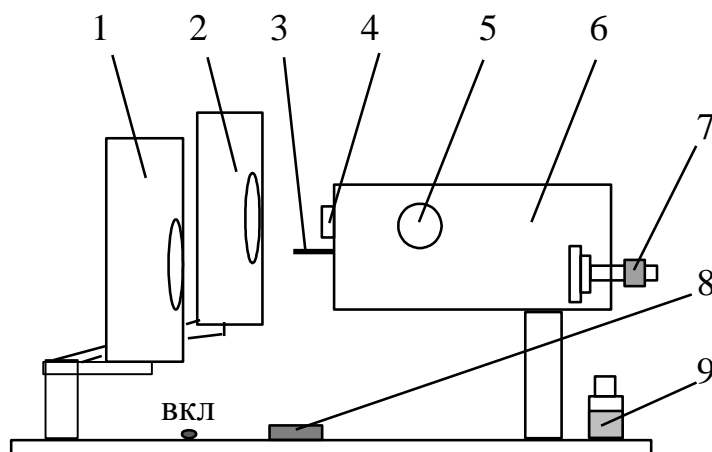


Рис. 4.10

Ртутная лампа 1 предназначена для градуировки шкалы спектрокопа. С помощью лампы накаливания 2 изучают спектр поглощения раствора двуххромового калия 9.

Оптическая схема спектрокопа показана на рис.4.11.

Свет от лампы входит в спектрокоп через щель 1 коллиматорной трубы, установленной в фокальной плоскости объектива 2. Проходя через объектив 2 свет параллельным пучком падает на призму 3, где происходит явление дисперсии, т.е. свет разлагается в спектр.

Отражаясь от посеребренной грани призмы 3 пучок света проходит снова объектив 2 и поворачивается в окуляр 5 с помощью призмы полного внутреннего отражения 4. Призму 3 можно поворачивать микрометрическим винтом, тем самым направляя в поле зрения окуляра различные участки спектра.

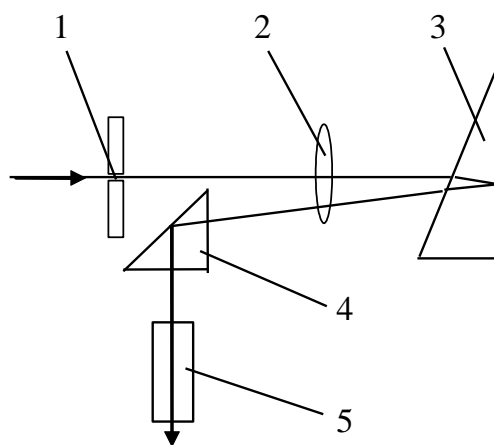


Рис. 4.11

Спектр наблюдают через окуляр 5 спектрокопа (см. рис.4.10), с помощью микрометрического винта 7 помещая в поле зрения последовательно различные участки спектра.

Градуировку спектрокопа проводят следующим образом. В ртутной лампе под действием электрического разряда происходит свечение разреженных паров ртути. Это свечение имеет линейчатый спектр линий различного цвета, как показано на рис.4.12.

Обозначение линий на рисунке соответствует их цвету: ж – желтая, з – зеленая, г – голубая, с – синяя, ф – фиолетовая. $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ м}$.

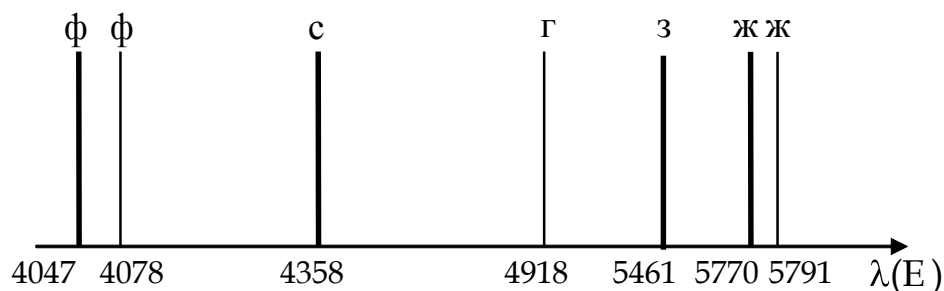


Рис. 4.12

Совмещая поочередно с визирной линией в окуляре линии спектра от ртутной лампы, по известным длинам волн можно построить градуировочный график зависимости длин волн λ спектра от соответствующих им делений шкалы микрометрического винта n , как это показано на рис.4.13.

Затем, пропуская свет от лампы накаливания через раствор двуххромовокислого калия, фиксируют деление шкалы микрометрического винта, соответствующее границе поглощения, и по графику рис.4.13 определяют граничную длину волны спектра поглощения двуххромовокислого калия.

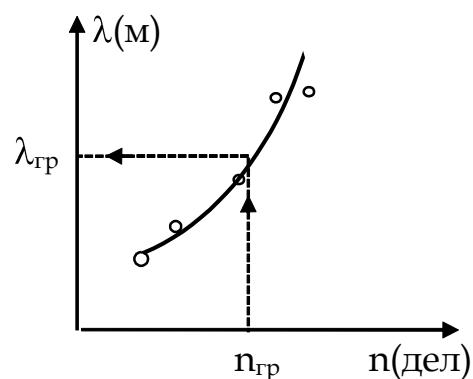


Рис. 4.13

Порядок выполнения работы

1. Включить установку в сеть (220В) и зажечь ртутную лампу переключателем 8 (рис.4.10).
2. Направить свет лампы на щель коллиматорной трубы 4 спектроскопа и установить окуляр 5 так, чтобы четко видеть спектр ртутных паров.
3. Совмещая при помощи микрометрического винта визирную линию окуляра поочередно с различными спектральными линиями, записать в табл.4.4 цвет спектральных линий и соответствующие им деления n на шкале винта.

Таблица 4.4

№ п.п	цвет линии	n мм	λ м
1	фиолетовый		
2	синий		
3	голубой		
4	зеленый		
5	желтый		

4. По рис.4.12 определить и записать в табл.4.4 длины волн наблюдаемых спектральных линий.

5. Построить градуировочную кривую (см.рис.4.13), откладывая по оси ординат длины волн λ спектральных линий, а по оси абсцисс – соответствующие им деления шкалы микрометрического винта n .

6. Выключить ртутную лампу и зажечь лампу накаливания.

7. С помощью поворотного кронштейна установить лампу накаливания напротив щели спектроскопа.

8. Наблюдая сплошной спектр лампы накаливания, поместить на полочку 3 (рис.4.10) флакон с двухромовокислым калием 9. Установить визирную линию на границу поглощения (зеленый цвет) и записать деление $n_{гр}$ шкалы микрометрического винта, соответствующее граничной длине волны $\lambda_{гр}$, с которой начинается поглощение.

9. Выключить установку из сети.

10. По градуировочному графику определить значение $\lambda_{гр}$ и по формуле (4.16) вычислить постоянную Планка.

11. Рассчитать относительную погрешность измерений

$$\delta = \frac{|h - h_{теор}|}{h_{теор}} \cdot 100\% .$$

Контрольные вопросы

1. Какие виды спектров излучения Вы знаете?
2. Что называется спектром поглощения? Приведите примеры.
3. Для какой цели в работе служат ртутная лампа и лампа накаливания?
4. Почему при пропускании света через раствор двухромовокислого калия в спектре исчезают длины волн от зеленого до фиолетового цвета, а не красного или желтого?
5. Какой физический смысл заключен в постоянной Планка?
6. Зачем в работе строят градуировочный график?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 132

Исследование параметров полупроводникового кристаллического диода

Цель работы: снятие вольт–амперной характеристики при прямом и обратном включении диода; определение сопротивления диода при прямом включении.

Краткая теория и методика измерений

Полупроводниковые диоды представляют собой контакт двух примесных полупроводников р- и n-типа и служат выпрямителями переменного тока. Они изготавливаются обычно из германия или кремния и могут быть точечными или плоскостными в зависимости от того, в точке или плоскости происходит контакт двух областей с разным типом проводимости. В данной работе исследуются характеристики точечного германиевого диода.

Вольт – амперная характеристика диода (зависимость тока от напряжения) показана на рис.4.14.

Она состоит из двух ветвей: при прямом включении ($u > 0$) и обратном ($u < 0$). Для наглядности прямая и обратная ветви вычерчены в разном масштабе, поскольку прямой ток измеряется в миллиамперах, а обратный – в микроамперах.

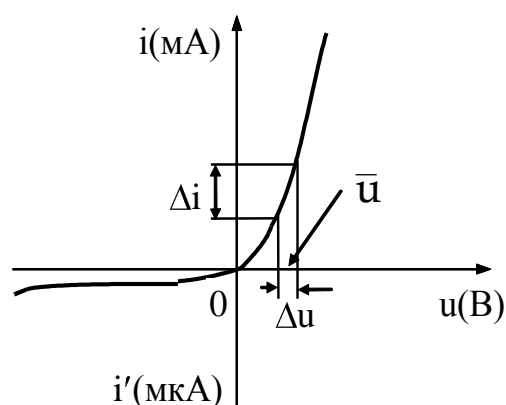


Рис. 4.14

Выпрямляющие свойства кристаллического диода характеризуются коэффициентом выпрямления, равному отношению токов для прямого и обратного включения при одной и той же величине напряжения:

$$\eta = \frac{i}{i'} \quad \text{при} \quad |u| = \text{const} \quad (4.17)$$

где i – прямой, i' – обратный токи.

Другой параметр кристаллического диода – величина внутреннего сопротивления R_i при прямом включении, т.е. в направлении пропускания тока:

$$R_i = \frac{\Delta u}{\Delta i}. \quad (4.18)$$

Величина R_i может быть определена методом графического дифференцирования по вольт–амперной характеристике (см. рис.4.14).

Экспериментальная установка

Для исследования характеристик полупроводникового диода предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.4.15.

Напряжение на германиевом диоде Z изменяют с помощью переменного сопротивления B . Значения прямого тока определяют по

миллиамперметру 1, поставив переключатель 4 в соответствующее положение. Значения обратного тока определяют по микроамперметру 2, предварительно изменив положение переключателя 4.

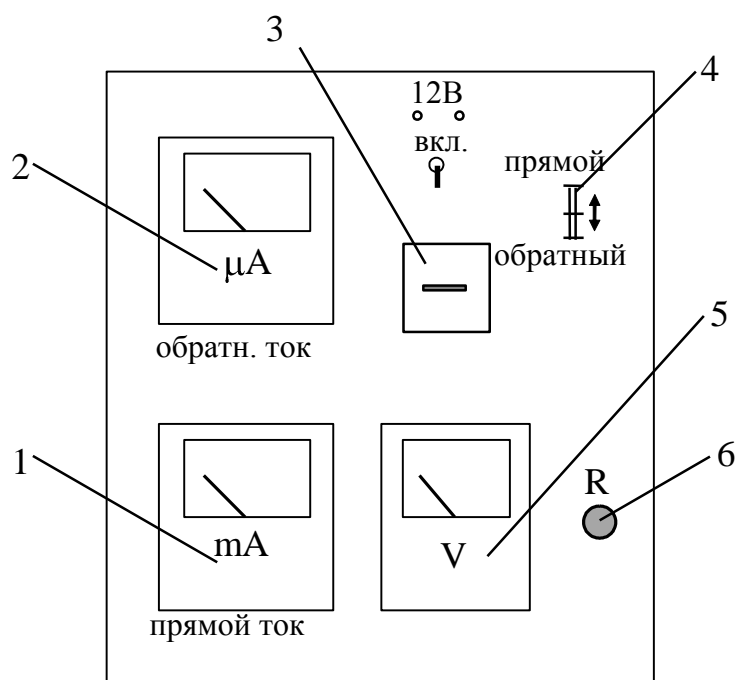


Рис. 4.15

Вольтметр 5 имеет различные пределы измерения: $u_{\max} = 3 \text{ В}$ при прямом включении и $u_{\max} = 15 \text{ В}$ при обратном. Вся шкала вольтметра соответствует $N = 75$ делениям. Цена 1 деления вольтметра при прямом включении:

$$u_0 = \frac{u_{\max}}{N} = \frac{3}{75} = 0,04 \text{ В},$$

а при обратном:

$$u_0 = \frac{15}{75} = 0,2 \text{ В}.$$

(4.19)

Порядок выполнения работы

1. Подключить установку к сети 12 В. Включить установку тумблером.

2. Снять вольт-амперную характеристику диода в прямом направлении. Для этого поставить переключатель 4 (рис.4.15) в нужное положение и с помощью регулируемого сопротивления 6 увеличивать напряжение u от 0 до 2 В через 0,2 В. При этом необходимо учесть цену деления вольтметра 5 согласно формуле (4.19). Для каждого значения напряжения измерить по миллиамперметру 1 величину прямого тока i . Результаты измерений занести в табл.4.5.

Таблица 4.5

Прямое напряжение u В	Прямой ток i мА	Обратное напряжение u' В	Обратный ток i' мкА
0,2		1	
0,4		2	
0,6		3	
0,8		4	
1,0		5	
1,2		6	
1,4		7	
1,6		8	
1,8		9	
2,0		10	

3. Снять вольт–амперную характеристику диода при обратном включении. Для этого установить переключатель 4 в положение “обратный” и с помощью регулируемого сопротивления 6 увеличивать напряжение на диоде от 0 до 10 В через 1 В (цена деления вольтметра при обратном включении изменяется, см формулу (4.19)). Для каждого значения напряжения фиксировать обратный ток i' по микроамперметру 2. Записать измерения в табл.4.5.

4. Отключить установку от сети.

5. Построить вольт–амперную характеристику диода в разном масштабе для прямого и обратного тока, чтобы ее вид соответствовал рис.4.14.

6. По формуле (4.17) найти коэффициент выпрямления η , взяв значения прямого i и обратного i' токов при величине напряжения $|u|=1$ В.

Таблица 4.6

№ п.п.	\bar{u} В	Δu В	Δi мА	R_i Ом	$\ln R_i$ –
1					
2					
3					
4					
5					
6					

7. По вольт–амперной характеристике диода определить внутреннее сопротивление диода R_i (4.18) при различных значениях прямого напряжения. Для этого разбить ось напряжений на 5 - 7 одинаковых интервалов Δu (см. рис.4.14), для каждого интервала найти соответствующие приращения тока Δi , и по формуле (4.18) рассчитать значение R_i . Это значение R_i соответствует среднему значению напряжения \bar{u} в интервале. Полученные данные записать в табл.4.6.

8. Построить график зависимости сопротивления от напряжения в полулогарифмическом масштабе: $\ln R_i = f(\bar{u})$.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте примесные полупроводники p- и n-типа.
2. Что такое кристаллический полупроводниковый диод?
3. Что называется коэффициентом выпрямления полупроводникового кристаллического диода?
4. В чем заключается метод графического дифференцирования для нахождения сопротивления R_i диода при прямом включении?
5. Объясните вид вольт–амперной характеристики диода для прямого и обратного напряжения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 136/137

Определение чувствительности фотоэлемента и фотосопротивления

Цель работы: определение интегральной чувствительности фотоэлемента с запирающим слоем и удельной чувствительности фотосопротивления.

Краткая теория и методика измерений

Селеновый **фотоэлемент** (лаб. работа № 136) с запирающим слоем имеет следующее устройство (рис.4.16). Железная пластинка, служащая первым электродом, покрывается слоем кристаллического селена, обладающего p–проводимостью. На поверхность селена наносится тонкий слой n–полупроводника (A–A). Вторым электродом служит полупрозрачный слой золота.

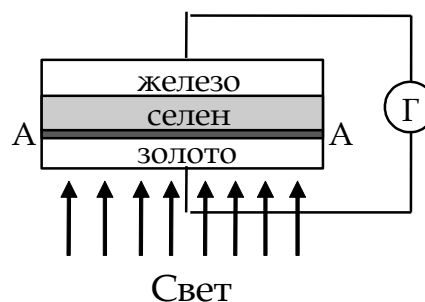


Рис. 4.16

Свет проходит через тонкий слой золота и попадает в область р–п перехода, образующегося между п–полупроводником и селеном. Наблюдается так называемый вентильный фотоэффект (фотоэффект запирающего слоя), в результате которого через гальванометр Г течет ток.

Интегральной чувствительностью фотоэлемента называется отношение фототока i к световому потоку, падающему на светочувствительную поверхность:

$$\sigma = \frac{i}{\Phi}. \quad (4.20)$$

Здесь Φ – световой поток, единицы измерения которого $[\Phi] = 1$ люмен (лм).

Пусть свет от точечного источника тока Р падает на поверхность фотоэлемента площадью S (рис.4.17). Сила света источника J кандел. Тогда на поверхность фотоэлемента, находящегося на расстоянии d , падает световой поток

$$\Phi = J\omega, \quad (4.21)$$

где $\omega = S/d^2$ – телесный угол, под которым видна поверхность S из точки Р.

Формулу (4.21) можно записать в виде

$$\Phi = \frac{JS}{d^2}. \quad (4.22)$$

Тогда согласно (4.20) интегральная чувствительность фотоэлемента равна

$$\sigma = \frac{id^2}{JS}. \quad (4.23)$$

Фотосопротивление (лаб. работа № 137)

состоит из светочувствительного слоя полупроводника 2 толщиной около 1 мкм, нанесенного на стеклянную пластину 1 (рис.4.18). На поверхность полупроводника наносятся электроды 2, обычно выполняемые из золота. Светочувствительная поверхность заливается толстым слоем прозрачного лака. Фотосопротивление монтируется в пластмассовом корпусе.

Под действием света собственная проводимость чистого полупроводника возрастает за счет появления свободных носителей

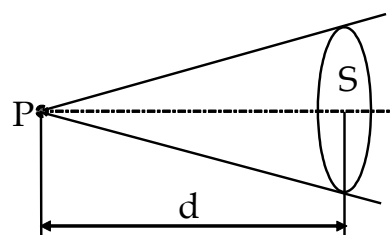


Рис. 4.17

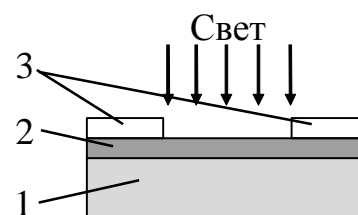


Рис. 4.18

заряда. Следовательно, при подключении внешнего напряжения u в цепи будет течь ток.

Интегральную чувствительность фотосопротивления можно также определить по формуле (4.23). Но, в отличие от фотоэлементов с запирающим слоем, у фотосопротивлений величина фототока зависит не только от освещенности, а и от приложенного напряжения. Поэтому для характеристики их качества применяют удельную чувствительность δ .

Удельной чувствительностью фотосопротивления называется отношение его интегральной чувствительности к приложенному напряжению

$$\delta = \frac{\sigma}{u}. \quad (4.24)$$

С учетом формулы (4.23) получаем

$$\delta = \frac{id^2}{JSu}. \quad (4.25)$$

Фотопроводимость полупроводниковых фотоэлементов и фотосопротивлений значительно выше, чем у фотоэлементов, основанных на внешнем фотоэффекте.

Экспериментальная установка

Для определения чувствительности фотоэлемента и фотосопротивления предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.4.19.

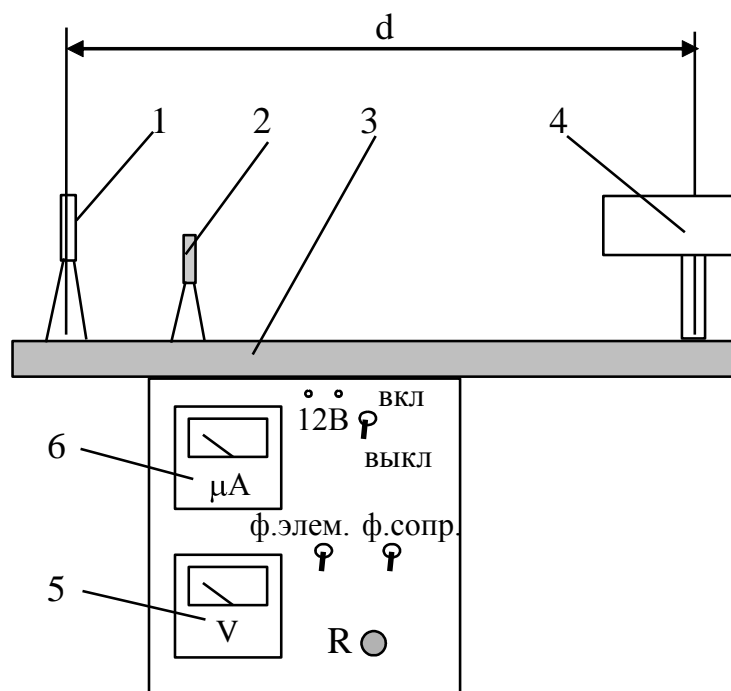


Рис. 4.19

На оптической скамье 3 размещаются: фотоэлемент с запирающим слоем 1, фотосопротивление 2 и источник света 4 – лампа накаливания. Подключение к измерительным приборам фотоэлемента и фотосопротивления осуществляется соответствующими тумблерами.

Перемещая лампу 4, можно изменять расстояние d от фотоэлемента до лампы, которое измеряется по шкале на оптической скамье 3.

Фототок измеряют микроамперметром 6. Напряжение на фотосопротивлении изменяют с помощью переменного сопротивления R и измеряют вольтметром 5.

Параметры установки:

радиус светочувствительной поверхности фотоэлемента $R = 0,018$ м,

площадь поверхности фотосопротивления $S = 35 \cdot 10^{-6}$ м,

сила света лампы $J = 25$ кд.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Определение интегральной чувствительности фотоэлемента с запирающим слоем.

1. Установить лампу 4 на расстоянии $d = 0,8$ м от фотоэлемента 1 (рис.4.19).
2. Подключить лампу к сети 220 В.
3. Открутив стопорный винт, опустить фотосопротивление 2, как показано на рис.4.19, чтобы оно не загораживало светочувствительную поверхность фотоэлемента 1. Открыть крышку фотоэлемента.
4. Установить переключатель «фотоэлемент» в положение «вкл», а переключатель «фотосопротивление» в положение «выкл».
5. Измерить фототок микроамперметром 6 и записать полученное значение в табл.4.7.

Таблица 4.7

№ п.п.	d м	i мкА	σ мкА/лм	$\bar{\sigma}$ мкА/лм
1	0,8			
2	0,9			
3	1,0			
4	1,1			
5	1,2			

6. Повторить измерения для расстояний от фотоэлемента до лампы $d = 0,9; 1,0; 1,1; 1,2$ м.

7. Закрывать крышку фотоэлемента.

8. Подсчитать площадь светочувствительной поверхности фотоэлемента $S = \pi R^2$. По формуле (4.23) вычислить интегральную чувствительность σ фотоэлемента для каждого расстояния.

9. Определить среднее значение интегральной чувствительности $\bar{\sigma}$ для всех измерений.

Упражнение 2.

Определение удельной чувствительности фотосопротивления.

1. Поместить лампу на расстоянии (30 – 40) см от фотосопротивления 2 (рис.4.19).

2. Поднять фотосопротивление 2 так, чтобы его светочувствительная поверхность располагалась на одной горизонтали с лампой 4. Открыть крышку фотосопротивления.

3. Подключить установку к сети 12 В и замкнуть цепь тумблером.

4. Установить переключатель “фотоэлемент” в положение «выкл», а переключатель «фотосопротивление» в положение «вкл».

5. С помощью регулируемого сопротивления R установить напряжение $u = 1$ В. При этом необходимо учесть цену деления вольтметра 5. Цена деления определяется по формуле

$$u_0 = \frac{u_{\max}}{N},$$

где u_{\max} – предел измерения вольтметра (написан на вольтметре), N – общее число делений шкалы вольтметра. (Чаще всего в работе применяется вольтметр с $u_{\max} = 15$ В и $N = 75$ делений, тогда цена одного деления $u_0 = 15/75 = 0,2$ В).

6. Измерить по микроамперметру 1 величину фототока i и результаты измерений занести в табл.4.8.

Таблица 4.8

№ п.п.	u В	i мкА	δ мкА/(лм·В)	δ̄ мкА/(лм·В)
1	1			
2	2			
3	3			
4	4			
5	5			
6	6			
7	7			
8	8			
9	9			
10	10			

7. Повторить измерения по п.п.5,6, увеличивая напряжение u через 1 В до значения 10 В.

8. Построить график зависимости фототока от приложенного напряжения $i = f(u)$.

9. По формуле (4.25) вычислить удельную чувствительность δ фотосопротивления и определить среднее значение $\bar{\delta}$ для всех измерений.

10. Отключить установку тумблером и отсоединить лампу от сети.

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство и принцип работы фотоэлемента, исследуемого в данной работе.

2. Что называется интегральной чувствительностью фотоэлемента?

3. Как рассчитать световой поток от точечного источника?

4. Опишите устройство и принцип работы фотосопротивления, исследуемого в данной работе.

5. В чем заключается вентильный фотоэффект?

6. Что такое удельная чувствительность фотосопротивления?

7. Объясните полученный в работе график.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 170

Определение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках

Цель работы: измерение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках различного типа.

Краткая теория и методика измерений

Концентрация носителей заряда в полупроводниках и их знак могут быть определены с помощью *эффекта Холла*.

Пусть по полупроводнику, имеющему форму прямоугольного параллелепипеда, протекает ток i . Поместим образец во внешнее

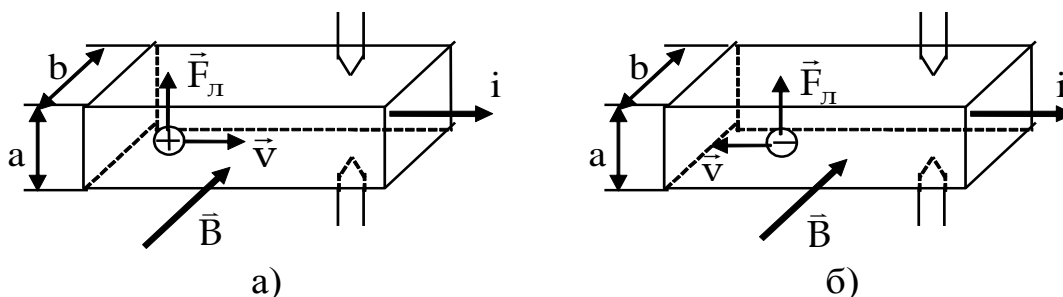


Рис. 4.20

магнитное поле, вектор магнитной индукции которого направлен перпендикулярно направлению тока и боковым граням образца (рис.4.20). Тогда между электродами, касающимися верхней и нижней грани образца, возникнет разность потенциалов $\Delta\varphi_x$.

Она обусловлена силой Лоренца \vec{F}_L , действующей со стороны магнитного поля на движущиеся носители заряда (электрон или дырку). Эта сила будет смещать заряд любого знака к верхней грани образца (см. рис.4.20 а,б). Следовательно, знак холловской разности потенциалов зависит от знака носителя заряда.

Возникающая разность потенциалов связана с силой тока в полупроводнике и индукцией магнитного поля формулой

$$\Delta\varphi_x = R_x \frac{Bi}{b}. \quad (4.26)$$

Величина R_x называется постоянной Холла.

Для полупроводников с основными носителями заряда одного знака (т.е. для р- или n- полупроводников) постоянная Холла определяется выражением

$$R_x = \frac{3\pi}{8|e|n}. \quad (4.27)$$

где $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - величина элементарного заряда, n - концентрация* основных носителей заряда в полупроводнике.

Следовательно, определив из опытных данных постоянную Холла, по формуле (4.27) можно вычислить концентрацию основных носителей заряда в р- или n- полупроводнике.

Подвижностью зарядов μ называется скорость упорядоченного движения носителей зарядов (электронов и дырок) при напряженности \vec{E} внешнего электрического поля, равной единице.

Если известно значение R_x , то для полупроводников с основными носителями заряда одного знака можно найти их подвижность μ :

$$\mu = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{R_x}{\rho}, \quad (4.28)$$

где ρ - удельное электросопротивление полупроводника.

При проведении измерений с помощью эффекта Холла следует учесть, что изменение направления магнитного поля или тока ведет к изменению знака $\Delta\varphi_x$. Это позволяет исключить всякого рода побочные эффекты, которые сохраняют свой знак при изменении

* Концентрацией частиц называется число этих частиц в единице объема вещества.

направления поля или тока. На практике измерения проводят дважды с противоположными направлениями тока или поля и берут среднее значение $\overline{\Delta\varphi_x}$.

Экспериментальная установка

Для определения концентрации и подвижности основных носителей заряда в примесных полупроводниках предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.4.21.

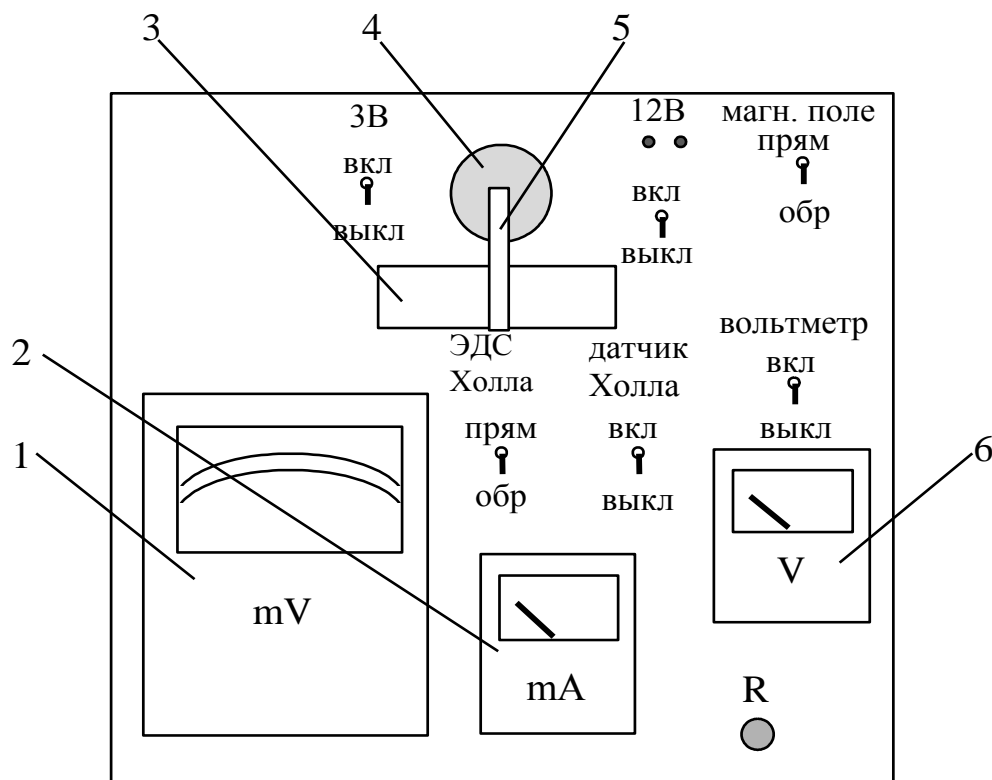


Рис. 4.21

Магнитное поле создается с помощью электромагнита. Катушка 4 электромагнита намотана на одну из сторон прямоугольного железного сердечника 5, имеющего прорезь для размещения датчика Холла 3. Источник питания датчика Холла включается тумблером «3В». Питание электромагнита осуществляется от источника постоянного тока напряжением 12 В, включаемого соответствующим тумблером.

В работе используются полупроводниковые датчики двух типов: с электронной и дырочной проводимостью. К полупроводниковой пластине припаяны две пары контактов: через одну пару протекает управляющий ток, а с другой пары снимается холловская разность потенциалов.

Величина управляющего тока изменяется с помощью регулируемого сопротивления R и измеряется миллиамперметром 2. Вольтметр 6 измеряет падение напряжения на пластине датчика Холла.

ЭДС Холла измеряется милливольтметром 1 со световой индикацией. Тумблер «Прямое и обратное магнитное поле» изменяет направление магнитного поля и одновременно полярность ЭДС Холла.

Параметры установки:

высота пластины датчика Холла $a = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м;

ширина пластины $b = 2 \cdot 10^{-4}$ м;

длина пластины $L = 6 \cdot 10^{-3}$ м;

индукция магнитного поля $B = 0,05$ Тл.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Определение концентрации носителей заряда.

1. Подключить установку к сети 12 В и подключить милливольтметр к сети 220 В.

2. Установить:

- а) тумблер «3В» в положение «вкл» (питание датчика Холла),
- б) тумблер «12В» в положение «вкл» (питание электромагнита),
- в) тумблеры «ЭДС Холла» и «магнитное поле» в положение «прямое»,
- г) тумблер «датчик Холла» в положение «вкл»,
- д) тумблер «вольтметр» должен быть в положении «выкл».

3. Увеличивая с помощью регулируемого сопротивления R управляющий ток через датчик от нуля до максимально возможного значения через 1 мА, снять зависимость ЭДС Холла $\Delta\varphi_{x1}$ (по милливольтметру 1) от величины управляющего тока i (по миллиамперметру 2). При этом необходимо учесть цену деления миллиамперметра 2, которая определяется по формуле

$$i_0 = \frac{i_{\max}}{N},$$

где i_{\max} – предел измерения миллиамперметра (написан на миллиамперметре), N – общее число делений шкалы миллиамперметра. Результаты измерений записать в табл.4.9.

4. Изменить направление магнитного поля, поставив тумблеры «магнитное поле» и «ЭДС Холла» в положение «обратное». Провести повторно измерения ЭДС Холла $\Delta\varphi_{x2}$ по п.3. Результаты занести в табл.4.9.

5. Вычислить среднеарифметическое значение ЭДС Холла:

$$\overline{\Delta\varphi_x} = \frac{\varphi_{x1} + \varphi_{x2}}{2}.$$

6. Построить график зависимости средней ЭДС Холла от величины управляющего тока $\overline{\Delta\varphi_x} = f(i)$. Рассчитать угловой коэффициент наклона к прямолинейного участка графика к оси абсцисс по значениям двух достаточно удаленных друг от друга точек А и В графика

$$k = \frac{\Delta\varphi_{xB} - \Delta\varphi_{xA}}{i_B - i_A}.$$

Таблица 4.9

№ п.п.	i мА	$\Delta\varphi_{x1}$ мВ	$\Delta\varphi_{x2}$ мВ	$\overline{\Delta\varphi_x}$ мВ
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

7. Согласно формуле (4.26) определить постоянную Холла

$$R_x = k \frac{b}{B}.$$

8. Из формулы (4.27) рассчитать концентрацию n носителей заряда.

Упражнение 2.

Определение подвижности носителей заряда.

1. Перевести тумблер «вольтметр» в положение «вкл», при этом автоматически отключается милливольтметр, измеряющий ЭДС Холла.

2. Увеличивая с помощью регулируемого сопротивления R управляющий ток через датчик от нуля до максимально возможного значения через 1 мА, снять зависимость падения напряжения на пластине датчика Холла u (по вольтметру 6) от величины управляющего тока i (по миллиамперметру 2). При измерениях предварительно рассчитать цену деления вольтметра по формуле

$$u_0 = \frac{u_{\max}}{N},$$

где u_{\max} – предел измерения вольтметра (написан на вольтметре), N – общее число делений шкалы вольтметра.

Результаты измерений записать в табл.4.10.

Таблица 4.10

№ п.п.	i А	u В
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

3. Построить график зависимости падения напряжения на пластине от величины управляющего тока $u = f(i)$. Рассчитать сопротивление r пластины, как угловой коэффициент наклона прямолинейного участка графика к оси абсцисс по значениям двух достаточно удаленных друг от друга точек А и В графика

$$r = \frac{u_B - u_A}{i_B - i_A}.$$

4. Определить удельное сопротивление полупроводника. Из известной формулы для сопротивления

$$r = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{ab}$$

следует

$$\rho = r \frac{ab}{L},$$

где a , b , L – размеры пластины датчика Холла.

5. По формуле (4.28) найти подвижность μ основных носителей заряда.

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводники n- и p- типа, каковы в них основные носители заряда?
2. В чем заключается эффект Холла?
3. Зависит ли знак ЭДС Холла от типа полупроводника?
4. Как в работе определяется концентрация основных носителей заряда?
5. Что такое подвижность основных носителей заряда полупроводника? Как она определяется в работе?

РАЗДЕЛ 5

Термодинамика и концепция самоорганизации природных систем

5.1. Методы описания многочастичных систем

Квантовая механика подтвердила вывод о том, что в природе существенную роль играют статистические, вероятностные закономерности*. Но эти закономерности проявляются не только в микромире, а применимы для любых *многочастичных* систем (статистических ансамблей), например, совокупности атомов или молекул газа†, жидкости. Звездные скопления, биологические популяции, масштабные коллективы в человеческом обществе также исследуются с помощью статистических закономерностей.

Есть два подхода к изучению многочастичных систем: макроскопический (так называемый, *феноменологический*) и микроскопический (*статистический*). Сравнение этих методов на примере молекулярной системы (например, газа) показано на рис.5.1.

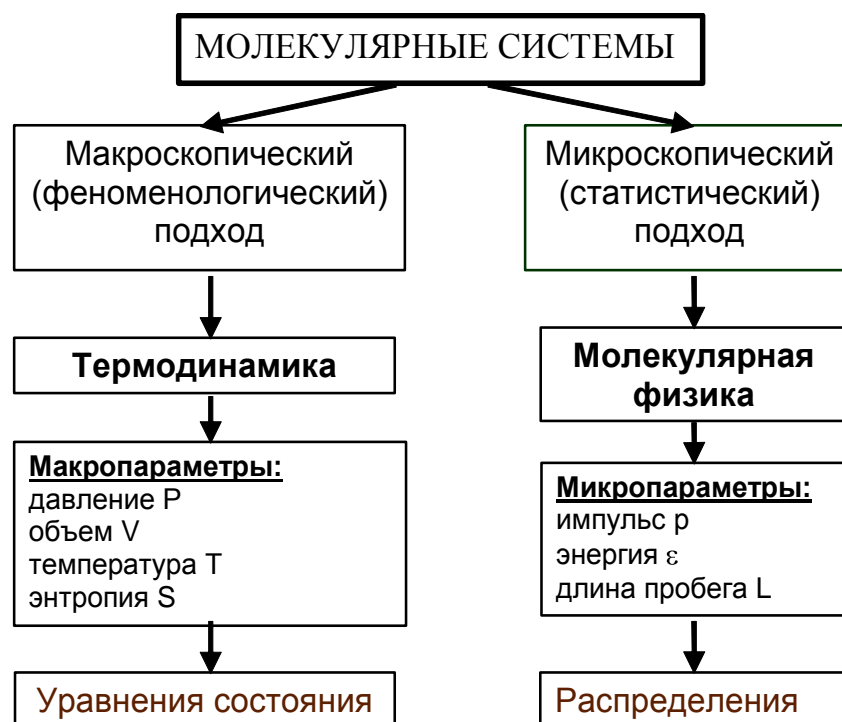


Рис. 5.1

При макроописании явлений не рассматривают поведение каждого из элементов этой системы и изменение его характеристик. В этом

* Например, квантовые статистики Бозе – Эйнштейна, Ферми-Дирака и др.

† К ним относится, в частности, статистика Максвелла – Больцмана.

случае оперируют величинами, характеризующими систему в целом, т.е. *макропараметрами* и находят количественные соотношения между этими величинами. Эти соотношения становятся основой *феноменологической теории**.

Один из примеров феноменологической теории – **термодинамика**.

Рассмотрим в качестве многочастичной системы идеальный† газ. Состояние этой системы описывается с помощью макроскопических параметров: давление, объем, температура, внутренняя энергия и т.д. Этот метод изучения молекулярных систем издавна называют **термодинамическим**.

Если во всех частях системы значения термодинамических параметров одинаковы, то говорят, что система находится в *термодинамическом равновесии*. Между термодинамическими параметрами системы, находящейся в термодинамическом равновесии, существуют устойчивые взаимосвязи, которые математически выражаются уравнениями состояния газа.

Наиболее известным из них является уравнение состояния идеального газа Менделеева - Клапейрона

$$PV = \nu RT. \quad (5.1)$$

В этом уравнении: P – давление, V – объем, T – температура, ν – количество вещества, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Экспериментальному определению универсальной газовой постоянной посвящена лабораторная работа № 33.

Из уравнения (5.1) следуют (при постоянной массе газа) известные законы *изопроцессов*. Графическое изображение изопроцессов на P - V диаграмме показано на рис. 5.2.

1. Изохорический процесс ($V = \text{const}$) – закон Шарля

$$\frac{P}{T} = \text{const}. \quad (5.2)$$

2. Изобарический процесс ($P = \text{const}$) – закон Гей-Люссака

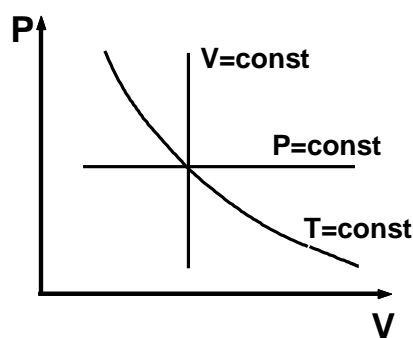


Рис. 5.2

* Феноменологический подход применяется во многих областях жизни: термодинамика, электростатика, закон всемирного тяготения, теория циклического развития мировой экономики, систематика видов в биологии и т.д.,

† Идеальным называется газ, молекулы которого можно рассматривать как материальные точки, взаимодействие которых между собой происходит только в момент соударения.

$$\frac{V}{T} = \text{const.} \quad (5.3)$$

3. Изотермический процесс ($T = \text{const}$) – закон Бойля - Мариотта

$$PV = \text{const.} \quad (5.4)$$

Уравнение (5.1) и следующие из него законы изо процессов (5.2) – (5.4) носят однозначный характер, т.е. *термодинамика представляет собой теорию динамического типа*, где состояние задается определенными значениями характеристик системы или ее элементов. В этом отношении термодинамика схожа с классической механикой.

При микроскопическом подходе к описанию явлений рассматривают структуру системы, поведение ее отдельных элементов и используют величины, характеризующие эти элементы – *микропараметры*. Так для молекулярной системы этими параметрами являются: масса частицы, энергия, импульс, скорость хаотического движения и т.д.

Однако описать индивидуальное поведение каждого элемента многочастичной системы невозможно. Поэтому в молекулярной физике оперируют величинами, которые характеризуют средние значения микропараметров. Т.е. в рамках статистического метода макросостояние определяется не микропараметрами, а *статистическими распределениями* этих величин.

Например, Максвелл получил статистическое равновесное распределение молекул газа по их скоростям:

$$\frac{dN}{N} = F(v)dv, \quad (5.5)$$

где dN/N – относительное число молекул, имеющих значение модуля скорости в диапазоне от v до $v + dv$ (или вероятность того, что скорость молекулы лежит в в диапазоне от v до $v + dv$); $F(v)$ – функция распределения.

Изучение распределения Максвелла проводится в лабораторной работе №29к, выполняемой на компьютерной модели.

Отметим, что микроскопический подход предполагает принципиально иное описание состояния по сравнению с теориями динамического типа. В статистических теориях однозначно определяются не сами характеристики элементов системы, а *вероятности* того, что они могут принимать значения внутри определенного числового диапазона.

Т.е. при использовании статистического метода состояние системы представляет собой ее вероятностную характеристику.

Эти два подхода: термодинамический и статистический взаимно дополняют друг друга

5.2 Начала термодинамики. Энтропия

Исследуя связь между параметрами различных термодинамических систем, термодинамика сформулировала основные законы обмена, передачи и сохранения энергии и дала им статистическое обоснование.

Начала термодинамики – это ее основные законы, сформулированные в результате обобщения большого числа опытных данных.

Первое начало термодинамики представляет собой закон сохранения энергии: *теплота Q , сообщаемая системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии ΔU и на совершение этой системой работы A*

$$Q = \Delta U + A. \quad (5.6)$$

С первым началом термодинамики связаны два важнейших понятия.

Первое – это понятие *теплоемкости*, как одного из свойств системы.

Теплоемкостью называется величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить системе, чтобы повысить ее температуру на один Кельвин.

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (5.7)$$

Следует заметить, что теплоемкость системы зависит от вида процессов, происходящих в системе.

Второе – это понятие *адиабатического* процесса.

Адиабатическим называют процесс, проходящий без теплообмена с внешней средой. На практике адиабатический процесс может быть осуществлен в системе, окруженной теплоизолирующей оболочкой*.

Так как при адиабатическом процессе $\delta Q = 0$, то первое начало термодинамики принимает вид

$$\delta A = -dU \quad (5.8)$$

т.е. работа, совершаемая системой при адиабатическом процессе, происходит за счет уменьшения внутренней энергии этой системы.

Из уравнения (5.8) можно получить *уравнение Пуассона*, описывающее связь термодинамических параметров (давления и объема) при адиабатическом процессе

$$P \cdot V^\gamma = \text{const}, \quad (5.9)$$

где γ – показатель адиабаты, характеризующий отношение теплоемкостей газа в изобарическом и изохорическом процессах

* Адиабатический процесс также реализуется при достаточно больших скоростях истечения газа из отверстия в сосуде, так как в этом случае теплообмен газа с окружающей средой не успевает произойти.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (5.10)$$

Изучению адиабатического процесса, а также определению отношения теплоемкостей газа посвящены лабораторные работы №№ 36к, 35 и 43.

Устанавливая баланс различных видов энергии при их переходе друг в друга, первое начало термодинамики не указывает направления процесса, связанного с преобразованием энергии.

Но в изолированной системе процессы не могут идти как угодно. Например, самопроизвольно идут процессы перехода механической энергии в тепловую за счет сил сопротивления или трения. Обратный же процесс преобразования тепла в работу без дополнительных затрат энергии идти не будет.

Второе начало термодинамики говорит о направленности процессов в природе. Существует несколько формулировок второго начала термодинамики.

Формулировка У. Кельвина и М. Планка: *невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты в работу.*

Формулировка Р. Клаузиуса: *не существует процесса, единственным результатом которого является передача количества теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.*

Для более глубокого понимания второго начала термодинамики отметим, что все процессы, происходящие в природе можно разделить на *обратимые и необратимые*.

Обратимым называется процесс, который может быть проведен в прямом и обратном направлении без остаточных изменений в окружающей среде. При обратимом процессе система проходит ряд последовательных равновесных состояний.

В *необратимых процессах* промежуточные состояния не являются равновесными. Систему, в которой произошли необратимые процессы, невозможно вернуть в исходное состояние без внешних воздействий.

Большинство процессов в природе *необратимы*. В природе существует тенденция к рассеянию (*диссипации*) энергии.

Для определения меры необратимого рассеяния энергии было введено одно из важнейших понятий современного естествознания – **энтропия**. В статистической физике показано, что энтропия системы связана с ее *термодинамической вероятностью*, т.е. числом способов реализации макросостояния системы, соотношением

$$S = k \ln w, \quad (5.11)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, w – вероятность состояния системы. Соотношение (5.11) называют **формулой Больцмана**.

Самопроизвольно в изолированной системе идут процессы, приводящие к увеличению вероятности состояния системы. Эта вероятность определяется числом микроскопических способов осуществления данного макросостояния w . Ясно, что чем выше степень беспорядка в координатах и скоростях частиц системы, тем больше w .

Таким образом, соотношение Больцмана раскрывает статистический смысл понятия энтропии: **энтропия является мерой неупорядоченности системы**.

Энтропия оказалась величиной, сохраняющейся в **обратимых** процессах, происходящих в **изолированных** системах. В **необратимых** процессах, происходящих в **изолированной** системе, энтропия возрастает.

Тогда, с помощью понятия энтропии, стало возможно сформулировать второй закон термодинамики математически: **энтропия изолированной системы не может убывать**:

$$\Delta S \geq 0. \quad (5.12)$$

Из соотношения (5.12) следует, что все изолированные системы эволюционируют в направлении от упорядоченности к хаотичности.

5.3. Второе начало термодинамики и эволюционная парадигма*

Выводы второго начала термодинамики вступили в противоречие с теорией эволюции, в основе которой лежит переход от более простых форм к сложным, более упорядоченным.

В рамках **эволюционной парадигмы** все многообразие и иерархичность материальных структур рассматриваются как закономерный результат всеобъемлющего эволюционного процесса. Т.е. в процессе развития происходит переход к более сложным, **упорядоченным** формам, что, на первый взгляд, противоречит выводам статистической физики и термодинамики, изложенным в предыдущем разделе.

Однако следует четко представлять, что все выводы предыдущего раздела относились к изолированным системам. Кажущиеся противоречия устраняются, если представить природные объекты в

* Научная парадигма – система основополагающих научных взглядов, господствующих в науке в определенный период ее развития.

виде *открытых неравновесных систем*, где происходит обмен энергией, веществом, информацией и т.д. Эти процессы, исследует *неравновесная термодинамика*.

Основоположником теории неравновесной термодинамики в *сильнонеравновесных системах* является бельгийский физик И. Пригожин (1917 - 2003 г.). Им были выявлены условия, при которых энтропия открытых систем может убывать, что означает возрастание упорядоченности в таких системах, формирование в них новых структур.

Процесс образования в системе определенной упорядоченной структуры без внешнего организующего воздействия называется самоорганизацией. Следует заметить, что у системы, как правило, имеется возможность «выбора» нескольких принципиально допустимых в данных условиях вариантов поведения.

Этот выбор носит вероятностный характер, что делает процесс эволюции системы принципиально необратимым.

Рассмотрим процесс самоорганизации с точки зрения энтропии.

Общее изменение энтропии термодинамической системы можно представить в виде двух слагаемых:

$$\Delta S = \Delta S(\text{внутр.}) + \Delta S(\text{внеш.}) \quad (5.13)$$

Первое слагаемое в этом уравнении характеризует изменение энтропии системы за счет внутренних процессов и в неравновесных системах всегда положительно, так как энтропия будет увеличиваться, пока система не придет в равновесное состояние.

Второе слагаемое характеризует изменение энтропии за счет процессов обмена с внешней средой. В открытых системах при образовании новых структур возникает такая ситуация, когда

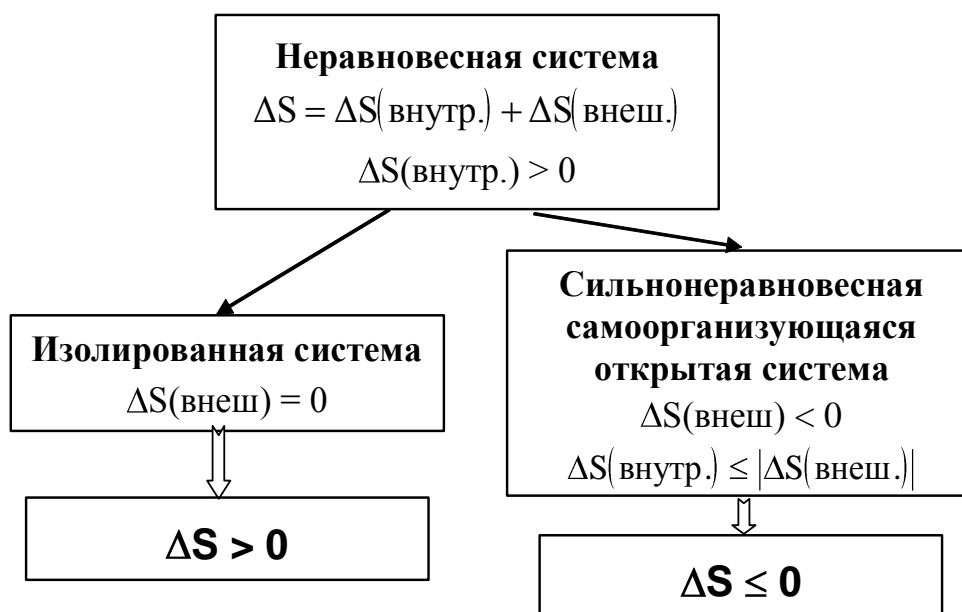


Рис. 5.3

$\Delta S(\text{внеш}) < 0$ т.е. энтропия в систему не поступает, а наоборот может из нее выводиться*. При этом выполняется соотношение $\Delta S(\text{внутр.}) \leq |\Delta S(\text{внутр.})|$. Тогда в целом $\Delta S \leq 0$, где знак равенства соответствует стационарному состоянию системы.

На рис.5.3 представлена сводная таблица, показывающая изменение энтропии в неравновесных системах.

Вопросы по разделу 5

1. Сравните феноменологический и статистический методы описания многочастичных систем.
2. Что называется состоянием термодинамического равновесия системы?
3. Что такое идеальный газ? Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы.
4. Роль вероятности в статистическом методе описания многочастичных систем.
5. Сформулируйте первое начало термодинамики. Дайте определение теплоемкости системы.
6. Какой процесс называется адиабатическим? Запишите уравнение Пуассона для адиабатического процесса.
7. Приведите формулировки второго начала термодинамики.
8. Энтропия, соотношение Больцмана. Статистический смысл понятия энтропии.
9. Какие процессы называются обратимыми и необратимыми? Как изменяется энтропия изолированной системы в этих процессах?
10. Какой процесс носит название самоорганизации? Каковы условия его реализации?
11. Изменение энтропии в неравновесных изолированных системах.
12. Изменение энтропии в неравновесных открытых системах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 33

Определение универсальной газовой постоянной

Цель работы: изучение процессов в идеальных газах и определение универсальной газовой постоянной R .

Краткая теория и методика измерений

Универсальная газовая постоянная R – это физическая константа в уравнении состояния идеального газа Менделеева – Клапейрона (5.1).

* Отрицательную составляющую энтропии $\Delta S(\text{внеш})$ иногда называют **негэнтропией**.

Метод экспериментального определения этой константы, используемый в данной работе, заключается в следующем.

Рассмотрим в определенном объеме V при одной и той же температуре два состояния идеального газа при двух различных значениях массы m_1 и m_2 . Запишем для них уравнения состояния (5.1)

$$\begin{aligned} P_1 V &= \nu_1 RT \\ P_2 V &= \nu_2 RT \end{aligned} \quad (5.14)$$

где P_1 и P_2 - давления газа в состояниях 1 и 2 соответственно.

Выразим количества вещества ν_1 и ν_2 через массу m газа и его молярную массу μ

$$\nu_1 = \frac{m_1}{\mu}; \quad \nu_2 = \frac{m_2}{\mu}. \quad (5.15)$$

Подставляя (5.15) в (5.14) и вычитая уравнения системы (5.14) друг из друга, получаем выражение для расчета универсальной газовой постоянной

$$R = \frac{\mu \cdot (P_1 - P_2) \cdot V}{(m_1 - m_2) \cdot T}. \quad (5.16)$$

Следовательно, для нахождения универсальной газовой постоянной надо измерить давление P_1 и температуру T некоторой массы m_1 газа, заключенной в сосуд известного объема V . Затем изменить массу газа до значения m_2 в том же объеме V (путем откачки или накачки газа) и вновь при той же температуре определить давление P_2 . Изменение массы газа ($m_1 - m_2$) можно определить, воспользовавшись техническими весами.

Экспериментальная установка

Для определения универсальной газовой постоянной предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.5.4.

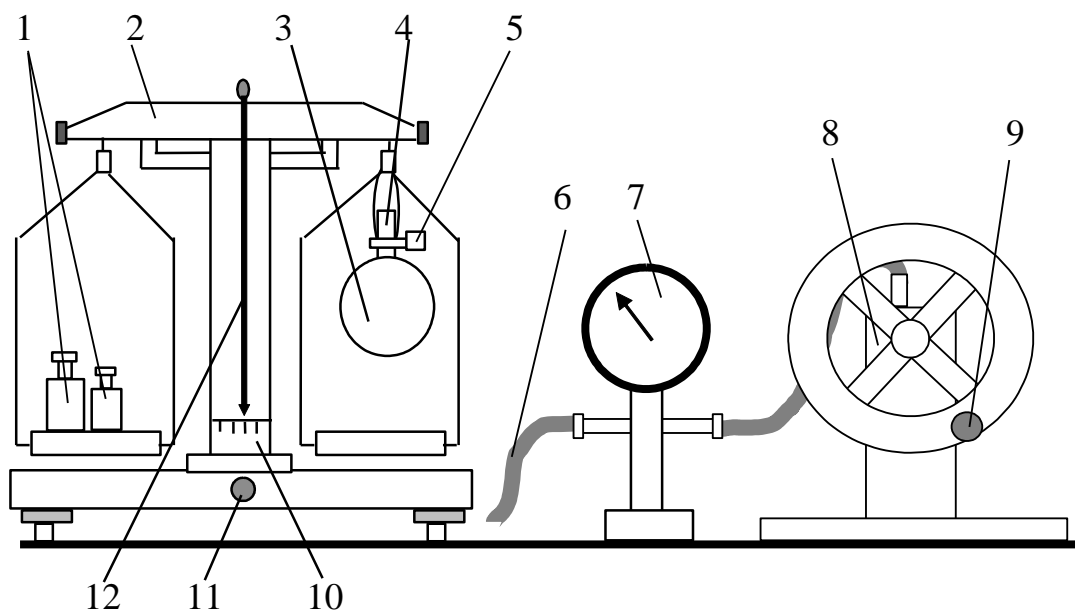


Рис. 5.4

Установка состоит из стеклянной колбы 3, имеющий штуцер 4 с хорошо притертым краном 5. Штуцер колбы можно соединять резиновой трубкой 6 с мановакуумметром 7.

Мановакуумметр 7 служит для измерения разности атмосферного давления и давления газа в колбе. Нулевое деление мановакуумметра соответствует случаю, когда давление в колбе равно атмосферному. Давление газа в колбе понижается вращением рукоятки 9 вакуумного насоса 8.

Массы воздуха и колбы определяются с помощью технических весов. Для этого со стороны одной из чашек весов к коромыслу 2 подвешивается колба 3 с воздухом, а с другой стороны на чашку весов помещаются разновески 1. Коромысло весов освобождается поворотом винта 11. При уравновешенных весах стрелка 12 находится посередине шкалы 10.

Порядок выполнения работы

1. Открыв кран 5, подвесить колбу 3 к коромыслу 2 со стороны одной из чашек весов и уравновесить коромысло с помощью разновесков 1. Определить суммарную массу $(m_0 + m_1)$, где m_0 - масса пустой колбы, m_1 - масса содержащегося в ней воздуха при атмосферном давлении P_1 . Результаты занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ п.п	(m_0+m_1) кг	(m_0+m_2) кг	(m_1-m_2) кг	T К	(P_1-P_2) Па	V м ³	R Дж моль·К	\bar{R} Дж моль·К
1								
2								
3								

2. По термометру определить температуру $T = (t + 273)$ К воздуха в лаборатории.

3. Колбу 3 соединить резиновой трубкой 6 с входным штуцером мановакуумметра 7. Выходной штуцер мановакуумметра должен быть соединен с насосом 8. Открыв краны на штуцерах мановакуумметра, откачать насосом воздух из колбы до некоторого давления P_2 и быстро закрыть кран выходного штуцера мановакуумметра. Записать измеренную разность давлений в таблицу, учитывая, что $(P_1 - P_2)$ [Па] равно показанию стрелки мановакуумметра, умноженному на 10^5 . Значение $(P_1 - P_2)$ должно находиться в диапазоне от $6 \cdot 10^4$ Па до $9 \cdot 10^4$ Па.

4. На технических весах определить массу $(m_0 + m_2)$, где m_2 - масса содержащегося в колбе воздуха после откачки. Разность значений,

полученных в п.1 и в данном измерении, равна $(m_1 - m_2)$, т.е. разности масс воздуха в колбе при атмосферном давлении и после откачки.

5. Измерения по пп. 1...4, повторить не менее трех раз для значений $(P_1 - P_2)$ в пределах от $6 \cdot 10^4$ Па до $9 \cdot 10^4$ Па.

6. По формуле (5.16) для каждого измерения определить полученное в опыте значение универсальной газовой постоянной R . Рассчитать среднее значение R по результатам опытов.

Молярная масса воздуха равна $\mu = 0,029$ кг/моль.

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнение состояния идеального газа
2. Что называется универсальной газовой постоянной? Каково ее теоретическое значение и физический смысл?
3. Какова размерность универсальной газовой постоянной в системе СИ?
4. Опишите метод, используемый в данной работе для определения значения универсальной газовой постоянной.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 29(к)

Распределение Максвелла

Цель работы: экспериментальное подтверждение с помощью компьютерной модели распределения молекул идеального газа по скоростям и определение молярной массы исследуемого газа.

Краткая теория

Рассмотрим газ в состоянии теплового равновесия при температуре T . Молекулы газа находятся в беспорядочном, хаотическом движении. Скорости молекул могут быть самыми различными и случайным образом изменяться при столкновении с другими молекулами.

Распределение молекул по величине (модулю) скорости v , полученное Максвеллом, имеет вид (5.5)

$$\frac{dN}{N} = F(v)dv, \quad (5.17)$$

где dN – число молекул, скорость которых находится в интервале от v до $v + dv$, N – суммарное число молекул в газе, $F(v)$ – функция распределения Максвелла:

$$F(v) = \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{m_0 v^2}{2kT} \right) \cdot 4\pi v^2. \quad (5.18)$$

Здесь m_0 – масса молекулы, T – абсолютная температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

С помощью распределения Максвелла можно рассчитать **характерные скорости** молекул.

1. Наиболее вероятная скорость v_B находится из условия, что функция $F(v)$ максимальна, то есть

$$\frac{dF(v)}{dv} = 0$$

Подставляя (5.18) и производя преобразования, получаем

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}, \quad (5.19)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная, μ - молярная масса газа.

2. Средняя арифметическая скорость молекул находится интегрированием

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v \cdot F(v) \cdot dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (5.20)$$

3. Средняя квадратичная скорость молекулы по определению равна

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}. \quad (5.21)$$

Находя интегрированием распределения Максвелла средний квадрат скорости

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^{\infty} v^2 \cdot F(v) \cdot dv = \frac{3kT}{m_0},$$

получаем

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (5.22)$$

Методика измерений

Из (5.17) следует, что число молекул ΔN , скорости которых лежат в диапазоне от v до $v + \Delta v$, при условии, что интервал Δv мал, можно представить как

$$\Delta N = N \cdot F(v) \Delta v. \quad (5.23)$$

Рассмотрим идеальный газ в закрытом сосуде ($N = \text{const}$). Будем экспериментально подсчитывать число молекул ΔN , скорости которых лежат вблизи значений v_1 , v_2 и т.д. и построим график зависимости $\Delta N = f(v)$. Если выбирать один и тот же интервал «разброса» значений скорости Δv , то этот график фактически будет иллюстрировать функцию распределения Максвелла (5.18). Примерный вид графика показан на рис.5.5.

Значение скорости, соответствующее максимуму $\Delta N/N$ является наиболее вероятной скоростью v_B (5.19), она может быть экспериментально определена по построенному графику.

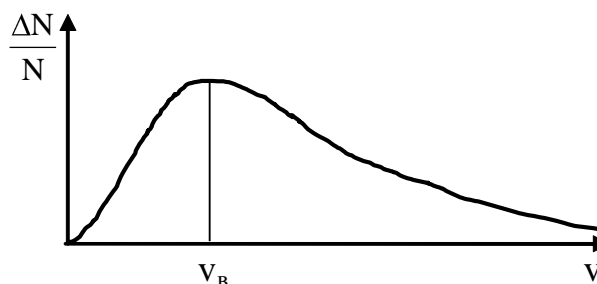


Рис. 5.5

Кроме того, подсчитав число молекул ΔN , скорости которых лежат вблизи значений v_1, v_2 и т.д., можно определить экспериментальное значение средней арифметической скорости молекул газа по формуле

$$\langle v \rangle = \frac{\overline{\Delta N}(v_1) \cdot v_1 + \overline{\Delta N}(v_2) \cdot v_2 + \dots + \overline{\Delta N}(v_7) \cdot v_7}{\sum \overline{\Delta N}}, \quad (5.24)$$

где $\sum \overline{\Delta N}$ - общее число молекул, участвующих в измерениях для каждой температуры во всем исследуемом диапазоне скоростей.

Как следует из выражения (5.20) среднеарифметическая скорость молекул зависит от температуры и от молярной массы газа.

Возведем в квадрат обе части формулы (5.20)

$$\langle v \rangle^2 = \frac{8RT}{\pi m}. \quad (5.25)$$

Если экспериментально определить среднюю арифметическую скорость молекул для различных значений температуры газа и построить зависимость $\langle v \rangle^2 = f(T)$, то по наклону полученной прямой можно определить молярную массу исследуемого газа.

Порядок выполнения работы

Запустить программу, подведя маркер мыши под значок "Открытая физика.1.1" на рабочем столе компьютера и дважды щёлкнув левой кнопкой мыши. Выбрать раздел «Термодинамика и молекулярная физика» и «Распределение Максвелла» (рис.5.6). Рассмотреть внимательно изображение на экране монитора компьютера. Обратит внимание на систему частиц, движущихся в замкнутом объеме слева во внутреннем окне. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Количество молекул около 100 и данная система является хорошей «механической» моделью идеального газа.

В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки «||» вверх) и получать как бы «мгновенные фотографии», на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном

диапазоне Δv вблизи заданной скорости v (т.е. имеющие скорости в интервале от v до $v+\Delta v$). Для продолжения наблюдения движения частиц нажимается кнопка «▶▶».

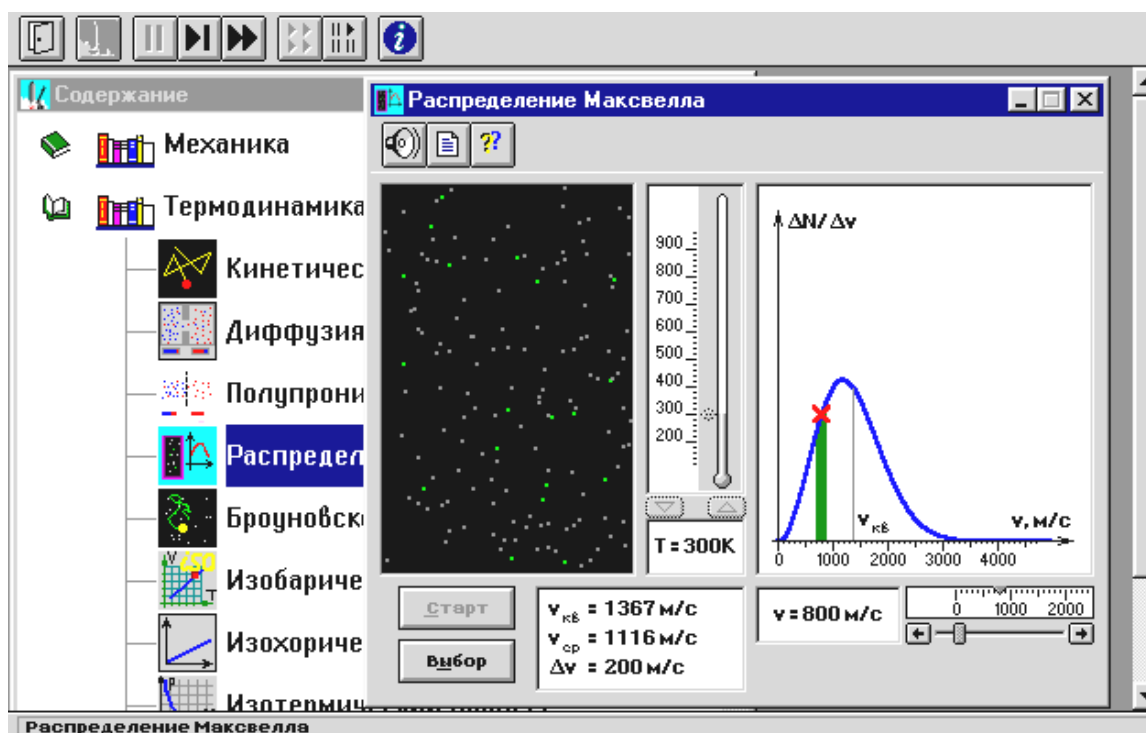


Рис. 5.6

Зарисовать график функции распределения Максвелла в свой конспект лабораторной работы. Дописать, если необходимо, нужные формулы (кнопка с изображением страницы служит для вызова теоретических сведений).

Упражнение 1.

Экспериментальное исследование распределения Максвелла.

1. Нажать мышью кнопки «▶▶» и «Выбор». Подвести маркер мыши к движку регулятора температуры и установить первое из полученных вашей бригадой от преподавателя значение температуры T_1 . Выписать в табл.5.2 теоретическое значение наиболее вероятной скорости $v_B^{\text{теор}}$ молекул (на модели установки она обозначена $v_{\text{наив}}$) для этой температуры.

2. Зацепив мышью движок, установить скорость v выделенной группы молекул вблизи первого заданного в таблице 5.2 значения.

3. Нажать мышью кнопку «Старт».

4. Через 10–20 секунд нажать кнопку «||» и подсчитать на «мгновенной фотографии» количество молекул ΔN , скорости которых лежат в диапазоне $\Delta v = 200$ м/с вблизи заданной скорости молекул v (они более яркие). Результат записать в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

$$T_1 = \text{_____ K}; v_B^{\text{теор}} = \text{_____ м/с}$$

№ п.п.	v [м/с]	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
1	ΔN							
2	ΔN							
Среднее	$\overline{\Delta N}$							

5. Нажать кнопку «▶▶» и через 10–20 секунд (нажав кнопку «||») получить еще одну мгновенную фотографию. Подсчитав количество частиц, результаты записать в табл.5.2. Рассчитать среднее значение числа молекул $\overline{\Delta N}$, скорости которых лежат вблизи заданного значения.

6. Изменить величину скорости и сделать по 2 измерения (п.п. 3–5) для каждого значения скорости из табл.5.2. Подсчитать среднее значение числа молекул $\overline{\Delta N}$ для этих измерений.

7. Устанавливая последовательно значения температуры T_2 и T_3 , повторить измерения (п.п. 2–6), записывая результаты в табл.5.3 и 5.4.

Таблица 5.3

$$T_2 = \text{_____ K}; v_B^{\text{теор}} = \text{_____ м/с}$$

№ п.п.	v [м/с]	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
1	ΔN							
2	ΔN							
Среднее	$\overline{\Delta N}$							

Таблица 5.4

$$T_3 = \text{_____ K}; v_B^{\text{теор}} = \text{_____ м/с}$$

№ п.п.	v [м/с]	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
1	ΔN							
2	ΔN							
Среднее	$\overline{\Delta N}$							

8. По результатам измерений построить для каждого значения температуры графики зависимости среднего числа молекул $\overline{\Delta N}$ от модуля скорости v.

9. По каждому построенному графику определить экспериментальное значение наиболее вероятной скорости v_B , соответствующей максимуму распределения Максвелла.

10. Сравнить полученные теоретические и экспериментальные значения и для каждой температуры подсчитать относительную погрешность измерений по формуле

$$\delta = \frac{v_B^{\text{теор}} - v_B}{v_B^{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

Упражнение 2.

Экспериментальное определение средней арифметической скорости и молярной массы исследуемого газа.

1. По данным таблиц 5.2, 5.3, 5.4, используя средние значения, подсчитать общее число молекул $\sum \overline{\Delta N}$, участвующих в измерениях для каждой температуры во всем исследуемом диапазоне скоростей. Результаты записать в табл. 5.5.

Таблица 5.5

№ п.п.	T К	$\sum \overline{\Delta N}$ –	$\langle v \rangle$ м/с	$\langle v \rangle^2$ (м/с) ²	Газ	$\langle v \rangle_{\text{теор}}$ м/с
1						
2						
3						

2. Для каждой температуры по данным таблиц 5.2, 5.3, 5.4 определить экспериментальное значение средней арифметической скорости молекул газа по формуле (5.24)

3. Подсчитать $\langle v \rangle^2$ и занести эти значения в табл.5.4.

4. Построить график зависимости квадрата средней арифметической скорости молекул $\langle v \rangle^2$ от температуры T и по двум любым точкам графика определить угловой коэффициент b полученной прямой:

$$b = \frac{\langle v \rangle_2^2 - \langle v \rangle_1^2}{T_2 - T_1}.$$

5. Согласно формуле (5.25) определить значение молярной массы газа

$$\mu = \frac{8R}{\pi b}. \quad (5.26)$$

6. По табл.5.6 подобрать газ, молярная масса которого достаточно близка к полученному по формуле (5.26) значению.

Таблица 5.6

Газ	Водород	Гелий	Неон	Азот	Кислород
μ [10^{-3} кг/моль]	2	4	20	28	36

7. По формуле (5.20) подсчитать и записать в табл. 5.5 теоретические значения средней арифметической скорости $\langle v \rangle_{\text{теор}}$ молекул газа.

8. Для каждого значения температуры вычислить относительную погрешность измерения по формуле

$$\delta = \frac{\langle v \rangle_{\text{теор}} - \langle v \rangle}{\langle v \rangle_{\text{теор}}} \cdot 100\% .$$

9. По всем построенным в лабораторной работе графикам провести анализ результатов и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается распределение Максвелла по модулю скорости?
2. Характерные скорости молекул в распределении Максвелла.
3. Как в работе получаются кривые распределения Максвелла для различных значений температуры газа?
4. Как экспериментально определить значение наиболее вероятной скорости молекул газа при заданной температуре?
5. Как теоретически и экспериментально можно определить значение средней арифметической скорости молекул газа при заданной температуре?
6. Как в работе определяется вид исследуемого газа?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36(к)

Адиабатический процесс

Цель работы: Исследование с помощью компьютерной модели основных термодинамических параметров газа в адиабатическом процессе и экспериментальное определение показателя адиабаты.

Краткая теория и методика измерений

Процесс, проходящий без теплообмена с внешней средой, называется адиабатическим. В данной работе исследуется адиабатическое расширение и сжатие газа в теплоизолированном сосуде.

Связь давления и объема газа в адиабатическом процессе определяется уравнением Пуассона (5.9)

$$P \cdot V^\gamma = \text{const} , \quad (5.27)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты.

Прологарифмируем выражение (5.27):

$$\ln P + \gamma \ln V = \ln(\text{const})$$

или

$$\ln P = k - \gamma \ln V , \quad (5.28)$$

где $k = \ln(\text{const})$.

Уравнение (5.28) показывает, что зависимость логарифма давления газа от логарифма его объема $\ln P = f(\ln V)$ является линейной. Построив по данным эксперимента эту зависимость, можно по наклону прямой рассчитать показатель адиабаты газа γ .

Из уравнения Пуассона (5.27) и уравнения состояния идеального газа (5.1)

$$PV = \nu RT. \quad (5.29)$$

можно получить связь температуры и объема газа при адиабатическом процессе. Выражая из уравнения (5.29) давление

$$P = \frac{\nu RT}{V},$$

и подставляя в уравнение Пуассона (5.27), получаем, что температура газа и его объем в любых двух точках адиабатического процесса связаны соотношением

$$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1}. \quad (5.30)$$

В данной работе эта зависимость подтверждается экспериментально.

Порядок выполнения работы

Запустить программу, подведя маркер мыши под значок "Открытая физика.1.1" на рабочем столе компьютера и дважды щёлкнув левой

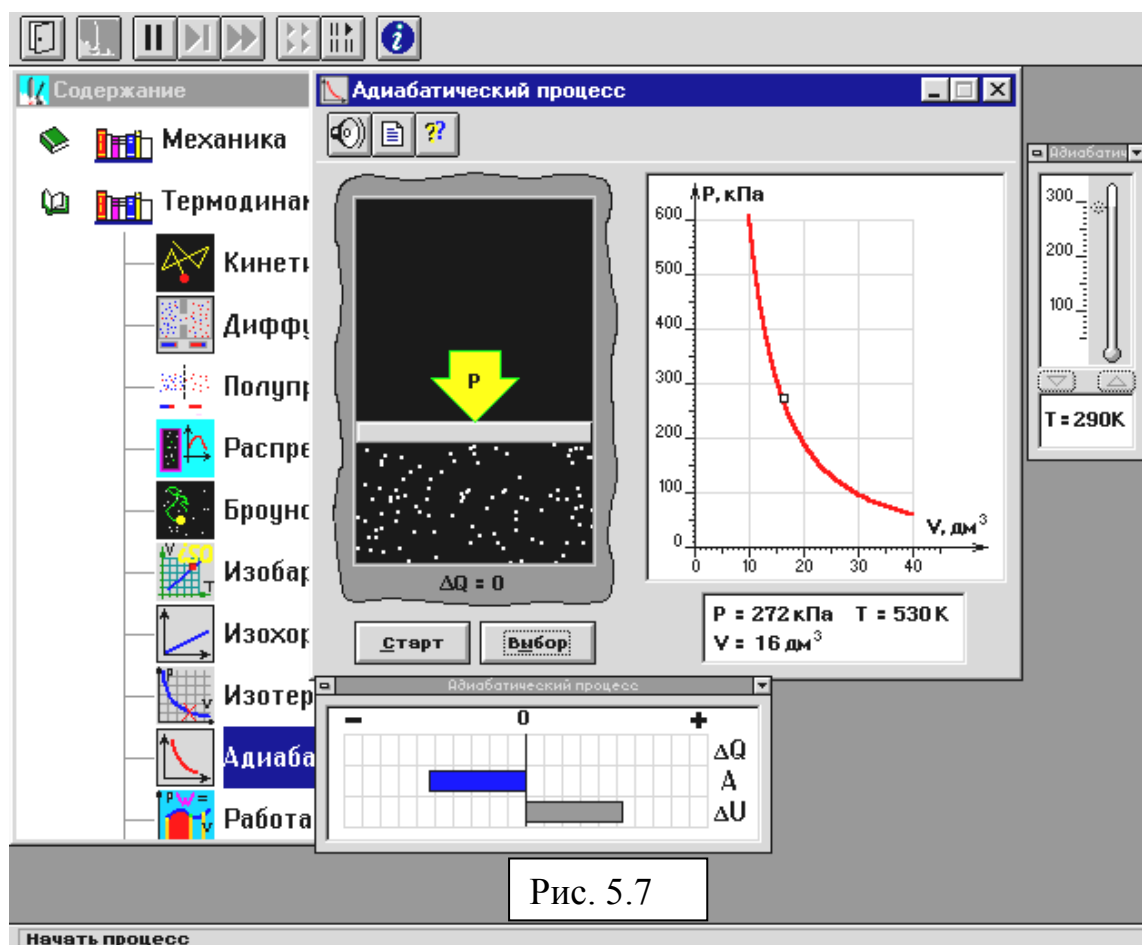


Рис. 5.7

кнопкой мыши. Выбрать раздел «Термодинамика и молекулярная физика», затем - «Адиабатический процесс» (рис.5.7).

Рассмотреть внимательно изображение на экране монитора компьютера. Найти рисунок элемента, в котором реализуется адиабатический процесс, и обратить внимание на его теплоизоляцию. Ознакомиться с графиком в правой части изображения.

Нажать мышью кнопку «СТАРТ» и наблюдать на экране перемещение поршня на модели и перемещение «крестика» по красной кривой теоретической адиабаты. Остановка процесса осуществляется нажатием кнопки «СТОП». Последующий запуск процесса производится нажатием кнопки «СТАРТ».

Зарисовать рабочий элемент и примерный вид графика в свой конспект лабораторной работы. Дописать, если необходимо, нужные формулы (кнопка с изображением страницы служит для вызова теоретических сведений).

1. Нажать кнопку «ВЫБОР». Подвести маркер мыши к кнопкам регулятора начальной температуры, находящимся под градусником. Установить первое из полученных вашей бригадой от преподавателя значение начальной температуры $T_{\text{нач}}$ газа. Записать в табл.5.7 значения давления P_1 и температуры T_1 газа при начальном объеме $V_{\text{нач}} = 40 \text{ дм}^3$.

Таблица 5.7

$$T_{\text{нач.}} = \underline{\quad} \text{ K}$$

№ п.п.	V дм ³	ln V –	P ₁ кПа	P ₂ кПа	\bar{P} кПа	ln \bar{P} –	T ₁ К	T ₂ К	\bar{T} К	T _{теор} К
1	15									
2	20									
3	25									
4	30									
5	35									
6	40									

2. Произвести измерения при адиабатическом сжатии газа. Для этого нажать мышью кнопку «СТАРТ». Останавливать процесс нажатием кнопки «СТОП», когда крестик на теоретической адиабате (красная кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: $V = 35, 30, 25, 20$ и 15 дм^3 . Записывать при остановке значения давления P_1 и температуры T_1 , в табл.5.7.

Если остановить процесс вовремя не удаётся, перейти в пошаговое выполнение: для этого надо нажать кнопки «||» и «Старт» и, нажимая кнопку «▶|», выполнить процесс по шагам.

3. Повторить измерения по п.2 для адиабатического расширения газа (т.е. изменяя объем от 15 дм³ до 40 дм³), записывая в табл.5.7 значения давления P_2 и температуры T_2 .

4. Для каждой пары измерений при одном и том же объеме газа рассчитать среднеарифметические значения давления

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}.$$

5. Подсчитать значения натуральных логарифмов от объема $\ln V$ и среднего давления $\ln \bar{P}$. Результаты записать в табл.5.7.

6. Установить второе значение начальной температуры $T_{\text{нач}}$ газа из данных для вашей бригады, и повторить измерения по п.п. 2–5, записывая результаты в таблицу 5.8.

Таблица 5.8

$$T_{\text{нач.}} = \text{---} \text{ K}$$

№ п.п.	V дм ³	ln V –	P ₁ кПа	P ₂ кПа	\bar{P} кПа	ln \bar{P} –	T ₁ К	T ₂ К	\bar{T} К	T _{теор} К
1	15									
2	20									
3	25									
4	30									
5	35									
6	40									

7. По данным двух таблиц построить графики зависимости натурального логарифма давления от натурального логарифма объема $\ln \bar{P} = f(\ln V)$.

8. На каждом графике выбрать две произвольные точки А и В и, согласно (5.28), определить показатель адиабаты как угловой коэффициент наклона полученного графика по формуле

$$\gamma = \frac{\ln P_A - \ln P_B}{\ln V_B - \ln V_A}.$$

9. Рассчитать среднеарифметическое значение показателя адиабаты $\bar{\gamma}$ по результатам двух графиков.

10. В каждой таблице рассчитать среднеарифметические значения температуры для одного и того же объема газа

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

11. Согласно формуле (5.30) определить теоретические значения температуры $T_{\text{теор}}$ для каждого значения объема газа

$$T_{\text{теор}} = T_{\text{нач}} \left(\frac{V_{\text{нач}}}{V} \right)^{\gamma-1},$$

где $V_{\text{нач}} = 40 \text{ дм}^3$.

12. По данным двух таблиц построить графики зависимости температуры газа от его объема $\bar{T} = f(V)$ и $T_{\text{теор}} = f(V)$ при адиабатическом процессе. Оценить наибольшую относительную погрешность измерений температуры

$$\delta = \frac{T_{\text{теор}} - \bar{T}}{T_{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

13. По всем построенным в лабораторной работе графикам провести анализ результатов и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется адиабатическим процессом?
2. Запишите уравнение Пуассона для адиабатического процесса.
3. Что называется показателем адиабаты газа?
4. Получите связь температуры и объема газа в адиабатическом процессе.
5. В чем заключается методика экспериментального определения показателя адиабаты газа в данной работе?
6. Как изменяется температура газа а) при его адиабатическом расширении, б) при адиабатическом сжатии?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35

Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме методом Клемана - Дезорма

Цель работы: изучение процессов в идеальных газах и определение отношения теплоемкостей γ .

Методика измерений

В данной лабораторной работе определяется величина, называемая показателем адиабаты (5.10) и равная отношению теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (5.31)$$

Для определения отношения теплоемкостей методом Клемана - Дезорма используется емкость, соединенная с открытым водяным

манометром, посредством которого измеряется разность давлений в емкости и в атмосфере.

Если в емкость, накачивать небольшое количество воздуха, то давление в ней будет повышаться и достигнет величины P'_1 , как это показано на P - V диаграмме (рис.5.8), где по оси абсцисс отложены объемы одного моля воздуха. Повышение давления в емкости при достаточно быстром нагнетании воздуха сопровождается повышением температуры до величины T_1 (процесс AB).

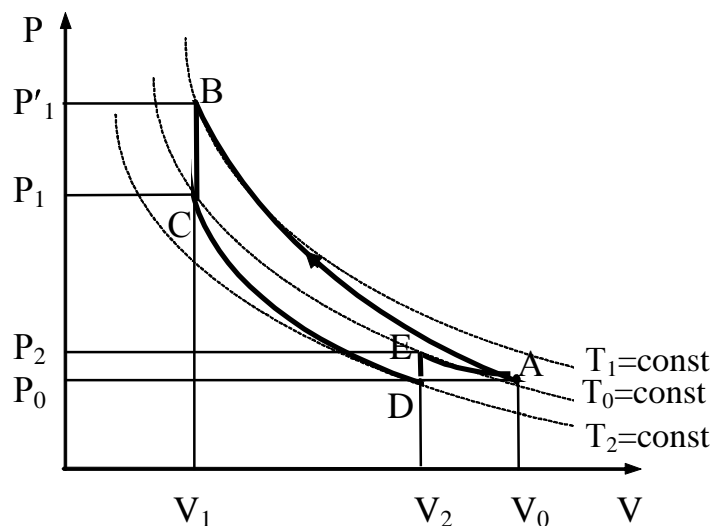


Рис. 5.8

Затем вследствие теплопроводности стенок сосуда воздух в закрытой емкости изохорически охлаждается, и через некоторое время температура станет равной температуре окружающей среды T_0 (процесс BC)

При этом давление в емкости понизится до величины P_1 . Уровни жидкости в манометре перестанут изменяться, и установится разность уровней h_1 . Это состояние воздуха в емкости будет иметь параметры: P_1, V_1, T_0 , причем

$$P_1 = P_0 + h_1, \quad (5.31)$$

где P_0 - атмосферное давление во время проведения опыта, h_1 - установившаяся в манометре разность уровней.

Если теперь соединить емкость с атмосферой, то произойдет адиабатическое расширение воздуха (процесс CD). Давление при этом понизится до атмосферного P_0 , молярный объем газа увеличится до величины V_2 , а температура уменьшится до величины T_2 . Таким образом, состояние газа D будет характеризоваться параметрами P_0, V_2, T_2 .

Поскольку процесс CD происходит адиабатически, то здесь справедливо уравнение Пуассона (5.9)

$$P \cdot V^\gamma = \text{const},$$

которое с учетом уравнения состояния идеального газа (5.1) можно представить в виде

$$\frac{T^\gamma}{P^{\gamma-1}} = \text{const.}$$

Следовательно, для состояний С и D можно записать

$$\frac{T_0^\gamma}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{P_0^{\gamma-1}}. \quad (5.32)$$

Далее вследствие теплопроводности стенок температура воздуха в емкости начнет повышаться изохорически, давление при этом будет увеличиваться (процесс DE). В состоянии E температура воздуха в емкости станет равной температуре окружающей среды T_0 . При этом давление возрастет до величины

$$P_2 = P_0 + h_2, \quad (5.33)$$

где h_2 - вновь установившаяся в манометре разность уровней.

Поскольку переход из состояния D в состояние E происходит без изменения объема, т.е. изохорически, в этом случае справедлив закон Шарля (5.2):

$$\frac{P_0}{T_2} = \frac{P_2}{T_0}. \quad (5.34)$$

Исключая из уравнений (5.31) – (5.34) неизвестную температуру T_2 и производя необходимые преобразования можно получить расчетную формулу для определения γ

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (5.35)$$

Для определения отношения теплоемкостей воздуха $\gamma = C_p/C_v$ предназначены экспериментальные установки с автоматическим или ручным нагнетанием воздуха.

1) Экспериментальная установка с автоматическим нагнетанием воздуха

Общий вид установки с автоматическим нагнетанием воздуха приведен на рис.5.9.

Установка состоит из емкости 2, соединенной с открытым водяным манометром 1. Нагнетание воздуха в емкость производится микрокомпрессором, вмонтированным в установку. Включение микрокомпрессора осуществляется тумблером 4. Рычаг 3 позволяет соединять емкость 2 с микрокомпрессором (положение «Закрото») или с атмосферой (положение «Открыто»).

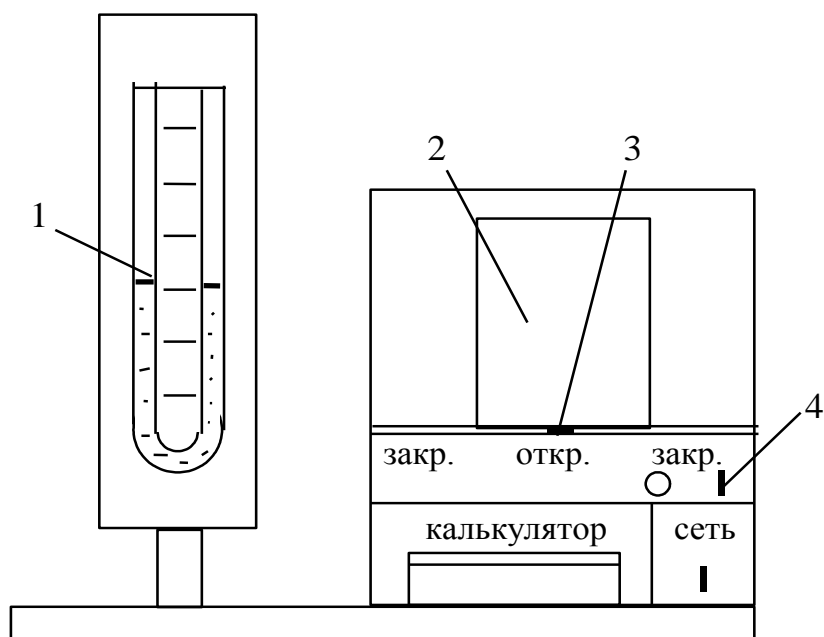


Рис. 5.9

Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером «Сеть»
2. Установить рычаг 3 в правое положение «Закр.» и включить микрокомпрессор тумблером 4. Когда разность уровней жидкости в манометре 1 достигнет (150...250) мм вод. ст., отключить микрокомпрессор.
3. Выждать, пока температура в емкости не станет равной температуре окружающей среды T_0 и не установится давление $P_1 = P_0 + h_1$, при этом разность уровней жидкости в манометре перестанет изменяться. Определить установившуюся разность уровней h_1 в коленях манометра и полученное значение занести в табл.5.9.

Таблица 5.9

№ п.п	h_1 мм вод. ст.	h_2 мм. вод. ст.	γ —	$\bar{\gamma}$ —
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

4. Кратковременно соединить емкость 2 с атмосферой при помощи рычага 3, быстро переведя его в левое положение «Закрыто». При этом произойдет адиабатическое расширение воздуха.

5. Выждать, пока уровни воды в коленах манометра не перестанут изменяться, после чего давление окончательно установится. Занести в табл.5.9 найденную разность уровней жидкости h_2 .

6. Опыт повторить не менее десяти раз, изменяя величину h_1 .

7. В каждом опыте по формуле (5.35) определить отношение теплоемкостей γ , а затем - среднее значение γ .

8. Оценить погрешность результатов измерений.

9. Выключить установку тумблером «Сеть».

2) Экспериментальная установка с ручным нагнетанием воздуха

Общий вид установки с ручным нагнетанием воздуха приведен на рис.5.10.

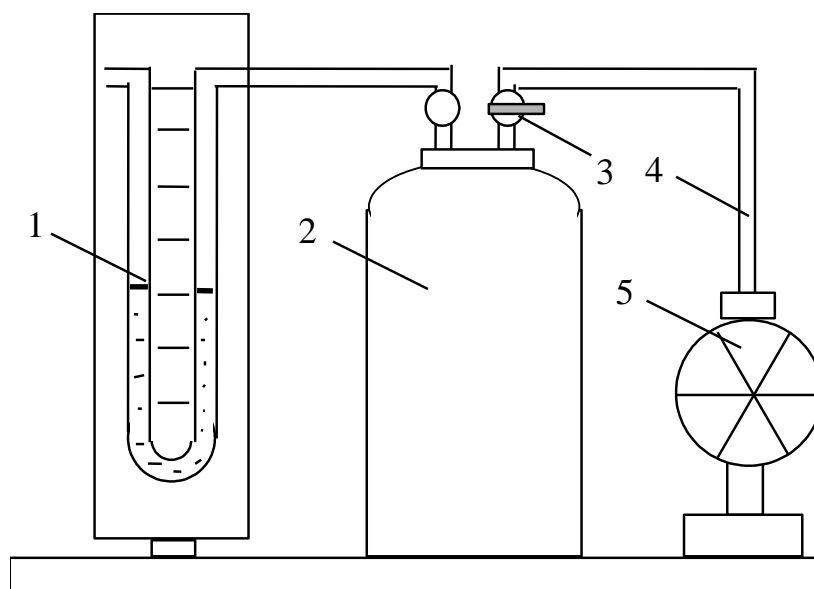


Рис. 5.10

Установка состоит из стеклянного баллона 2, соединенного с открытым водяным манометром 1. Нагнетание воздуха в емкость производится насосом 5. Трехходовой кран 3 позволяет соединять стеклянный баллон 2 с насосом или с атмосферой.

Порядок выполнения работы

1. Повернуть кран 3 так, чтобы соединить баллон 2 с насосом 5 через трубку 4.

2. Насосом осторожно нагнетать воздух в баллон 2, пока разность уровней жидкости в манометре не достигнет (150...250) мм вод. ст. После этого перекрыть кран 3.

3. Выждать, пока температура в баллоне не станет равной температуре окружающей среды T_0 и не установится давление $P_1 = P_0 + h_1$, при этом разность уровней жидкости в манометре перестанет изменяться. Определить установившуюся разность уровней h_1 в коленах манометра и полученное значение занести в табл.5.10.

Таблица 5.10

№ п.п	h_1 мм вод. ст.	h_2 мм. вод. ст.	γ —	$\bar{\gamma}$ —
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

4. Кратковременно соединить баллон 2 с атмосферой и в момент, когда уровни в трубках манометра совпадут (при этом давление в баллоне станет равным атмосферному), быстро закрыть трехходовой кран 3. При этом произойдет адиабатическое расширение воздуха.

5. Выждать, пока уровни воды в коленах манометра не перестанут изменяться, после чего давление окончательно установится. Занести в табл.5.10 найденную разность уровней жидкости h_2 .

6. Опыт повторить не менее десяти раз, изменяя величину h_1 .

7. В каждом опыте по формуле (5.35) определить отношение теплоемкостей γ , а затем - среднее значение γ .

8. Оценить погрешность результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Что называется теплоемкостью газа?

2. Что такое адиабатический процесс и показатель адиабаты идеального газа?

3. В чем заключается сущность описанного в работе метода определения отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме?

4. Как в работе определяется давление газа в различных состояниях?

5. Какие процессы реализуются в установке? Изобразите их на $P - V$ диаграмме.

6. Запишите связь термодинамических параметров для процессов, происходящих в установке.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43

Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме методом интерференции

Цель работы: определение отношения теплоемкостей $\gamma = C_p/C_v$ на основе процесса распространения звуковой волны в газе и измерения скорости звука методом интерференции.

Методика измерений

Упругими волнами называются механические возмущения (деформации), распространяющиеся в упругой среде. *Звуковыми*, или акустическими, волнами называются упругие волны малой интенсивности. Звуковые волны, способные вызвать звуковые ощущения, воздействующие на органы слуха человека, имеют частоты в пределах от 16 до 20000 Гц.

Рассмотрим распространение звуковой волны в газе. Как известно, выражение для скорости продольных упругих волн в сплошной среде имеет вид

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}, \quad (5.36)$$

где k - модуль объемной упругости*, ρ - плотность невозмущенной среды.

Звуковая волна представляет собой перемещающуюся в пространстве последовательность чередующихся областей сжатия и разрежения газа. Сжатия и разрежения сменяют друг друга настолько быстро, что теплообмен между слоями газа, имеющими разные температуры, не успевает произойти. Поэтому процесс распространения звуковой волны в газе можно считать адиабатическим.

* Модуль объемной упругости k аналогичен модулю продольной упругости (модулю Юнга), который характеризует одномерные деформации.

Выразим модуль объемной упругости k через добавочное давление dP , возникающее при сжатии газа, и относительную объемную деформацию dV/V . Полагая изменения давления dP и объема dV бесконечно малыми

$$k = -\frac{dP}{dV/V}, \quad (5.37)$$

где знак минус означает, что увеличению давления соответствует уменьшение объема.

Запишем уравнение Пуассона (5.9), описывающее адиабатический процесс в газе

$$P \cdot V^\gamma = \text{const}$$

и продифференцируем его

$$V^\gamma dP + \gamma P V^{\gamma-1} dV = 0.$$

Откуда следует

$$\frac{dP}{dV/V} = -\gamma P. \quad (5.38)$$

Решив совместно (5.38) и (5.37), найдем

$$k = \gamma P. \quad (5.39)$$

Определим плотность газа ρ из уравнения состояния (5.1) с учетом известной формулы $m = \rho V$ (m – масса газа):

$$\rho = \frac{P\mu}{RT}. \quad (5.40)$$

Подставляя (5.39) и (5.40) в (5.36), получаем формулу Лапласа для расчета скорости звука в газе

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (5.41)$$

из которой следует расчетная формула для определения γ

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{v^2 \mu}{RT}. \quad (5.42)$$

Таким образом, для определения отношения теплоемкостей газа γ достаточно измерить его температуру и скорость распространения звука в нем.

В данной работе измерение скорости звука в воздухе производится методом интерференции. С этой целью звуковая волна от источника колебаний разделяется на два звуковых потока, которые затем соединяются друг с другом. Волны как бы исходят от двух когерентных источников, и при их наложении будет наблюдаться явление интерференции.

Изменяя длину пути одного из звуковых потоков, тем самым можно изменять разность хода двух волн и, следовательно, интенсивность

результатирующей волны. Два соседних минимума (или максимума) при интерференции соответствуют изменению разности хода на длину волны λ . Определив λ , скорость звука можно определить по формуле

$$v = \lambda f, \quad (5.43)$$

где f - частота колебаний.

Экспериментальная установка

Для определения отношения теплоемкостей γ методом интерференции предназначена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.5.11.

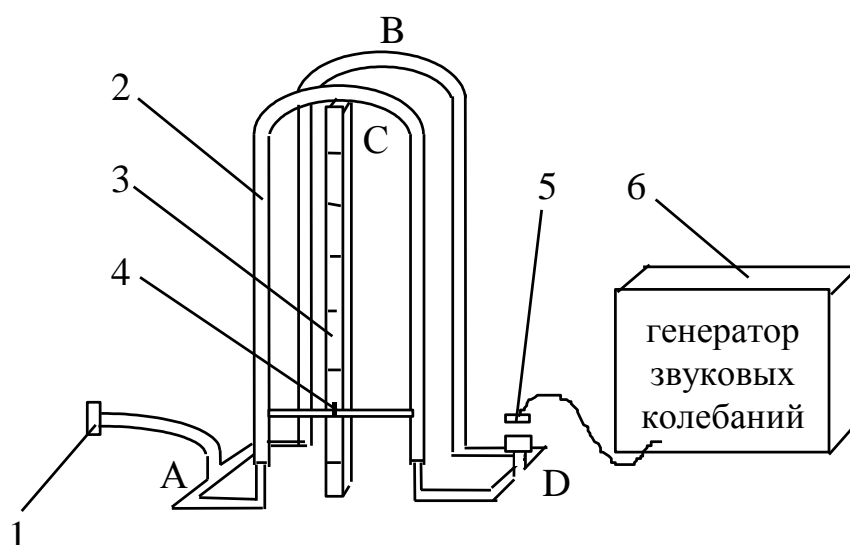


Рис. 5.11

Установка состоит из генератора звуковых колебаний 6 и прибора для измерения скорости звука акустическим методом. Звуковые колебания в приборе возбуждаются телефоном 5 и улавливаются слуховой трубкой 1.

Прибор имеет две коленчатые трубки: ABD постоянной длины и ACD переменной длины (ее длину можно изменять перемещением колена 2). Удлинение колена определяется по шкале 3. Разность хода двух волн равна удвоенному удлинению ΔL колена 2, определяемому по шкале 3.

Порядок выполнения работы

1. Подключить трубку телефона 5 к генератору звуковых колебаний 6 и разместить ее в соответствующем гнезде прибора (рис.5.12).

2. Включить генератор тумблером «Сеть» и установить частоту колебаний $f = 1500$ Гц.

3. Услышав звук в слуховой трубке 1, медленно перемещать подвижное колено 2 прибора. Определить показания L по шкале 3,

соответствующие положению указателя 4 при всех минимумах звука. Результаты измерений занести в табл.5.11.

4. Рассчитать расстояния ΔL между всеми последовательными положениями указателя 4:

$$\Delta L = L_{k+1} - L_k,$$

где k - номер минимума звука. Результаты записать в табл.5.11.

Таблица 5.11

№ п.п	f Гц	L м	ΔL м	$\overline{\Delta L}$ м	T К	v м/с	γ —	$\overline{\gamma}$ —
1								
2								
3								

5. Определить среднее значение $\overline{\Delta L}$ для заданной частоты колебаний.

6. Измерения по п.п 3...5 повторить для трех значений частоты колебаний f в диапазоне, равном (1500 - 6000) Гц.

7. Определить для каждого значения частоты колебаний скорость звука по формуле (5.43), учитывая, что $\lambda = 2\overline{\Delta L}$.

8. Определить температуру T в помещении лаборатории.

9. Для каждого значения частоты колебаний по формуле (5.42) рассчитать отношение теплоемкостей воздуха γ , учитывая, что молярная масса воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

10. Найти среднее значение $\overline{\gamma}$.

11. Оценить погрешность результатов измерений.

12. Выключить установку тумблером «Сеть».

Контрольные вопросы

1. Что называется адиабатическим процессом? Запишите уравнение Пуассона для адиабатического процесса.

2. Что называется теплоемкостью газа и его показателем адиабаты?

3. Почему процесс распространения звуковой волны является адиабатическим?
4. Запишите выражение для скорости упругих волн в сплошной среде.
5. Для чего необходимо перемещать колено прибора?
6. Опишите методику измерения отношения теплоемкостей γ методом интерференции звука.

ТЕМЫ ДОКЛАДОВ

1 СЕМЕСТР

1. Наука древнего Востока.
2. Возникновение науки в античной культуре.
3. Корпускулярная и континуальная концепции в доклассической науке.
4. Наука, вера, знание в условиях средневековья.
5. Механистическая картина мира. Редукционизм.
6. Симметрия и ее роль в нашей жизни.
7. Свойства пространства и времени и их связь с фундаментальными законами.
8. Современные понятия о пространстве и времени.
9. Создание и становление специальной теории относительности.
10. Основные принципы общей теории относительности.
11. Альберт Эйнштейн и его вклад в развитие естествознания.
12. Становление и развитие континуальной концепции.
13. Возникновение и развитие принципов дальнего действия и ближнего действия.
14. Понятие поля и его роль в современной науке.
15. Шарль-Огюстен Кулон и его вклад в развитие учения об электричестве.
16. Андре-Мари Ампер и его вклад в развитие электродинамики.
17. Никола Тесла – человек, опередивший свое время.
18. Электромагнетизм и специальная теория относительности.
19. Майкл Фарадей и его исследования в области электромагнетизма.
20. Основные этапы развития знаний об электричестве и магнетизме.
21. Природа и свойства электромагнитных волн.
22. Начальный этап развития химии. Учение о составе вещества.
23. Концепция структуры веществ: теория Фридриха Кекуле.
24. Теория химического строения в трудах А.М. Бутлерова.
25. Периодическая система Д.И. Менделеева. Химические связи атомов.
26. Основы классификации в трудах Карла Линнея.
27. Теория эволюции Дарвина.
28. Иоганн Мендель – основоположник теории наследственности. Законы Менделя.

2 СЕМЕСТР

1. Квантово-волновой дуализм частиц. Гипотеза де Бройля.
2. Уравнение Шредингера – основное уравнение квантовой механики.
3. Понятие о волновой функции. Ее физический смысл.
4. Прохождение частиц через потенциальный барьер.
5. Туннельный эффект и его роль в природе.
6. Развитие знаний о строении атома.
7. Модели атома в физике (от первой до современных).
8. Квантовая механика и свойства химических элементов.
9. Основные концепции квантовой механики.
10. Построение таблицы Менделеева с позиций квантовой механики.
11. Ядерная энергетика. Виды ядерных реакторов.
12. Ядерное оружие, его разрушительная сила и опасность уничтожения жизни на Земле.
13. Элементарные частицы.
14. Современные теории строения ядра.
15. Проблемы термоядерного синтеза.
16. Полупроводники. Полупроводниковые фотоэлементы, солнечные батареи, диоды, транзисторы.
17. Микро- и нано- системы и технологии, их роль в нашей жизни и технике.
18. Лазеры – их виды и свойства.
19. Современные ускорители элементарных частиц.
20. Сверхпроводники.
21. Н.Н. Семенов – основатель учения о химическом процессе.
22. Методы и способы регулирования скорости химических реакций.
23. Энергетика химических процессов.
24. Основы катализа в химии.
25. Элионные технологии (взаимодействие потоков ускоренных частиц с обрабатываемыми материалами).
26. Химия экстремальных состояний. Ее развитие в наше время.
27. Развитие и становление классической термодинамики.
28. Процессы в газах. Уравнения состояния газов. Понятие об изо процессах.
29. Сравнение термодинамического и статистического методов исследования многочастичных систем.
30. Понятие энтропии и ее физический смысл.
31. Второе начало термодинамики и «демон Максвелла».

32. Обратимые и необратимые процессы в природе.
33. Статистические распределения в молекулярной физике.
34. Термодинамика неравновесных систем.
35. Явления переноса в неравновесных системах.
36. Неравновесная термодинамика в теории самоорганизации И. Пригожина.
37. Эволюция сильнонеравновесных систем. Точка бифуркации, проблема предопределенности и выбора.
38. Производство энтропии в сильнонеравновесных системах.
39. Второе начало термодинамики и теория эволюции.
40. Становление и развитие синергетики.
41. Самоорганизация в открытых системах: необходимые условия и признаки.
42. Модели эволюции Вселенной.
43. Модель «большого взрыва» и «инфляционная модель».
44. Модели эволюции Земли.
45. Проблемы дальнейшей эволюции Земли.
46. Состав, свойства и эволюция атмосферы Земли.
47. Гидросфера Земли и проблемы ее дальнейшей эволюции.
48. Ферменты и их роль в нашей жизни.
49. «Подражание живой природе – химизм будущего»
50. Биокатализаторы.
51. Субстратный подход в эволюционной химии.
52. Функциональный подход в эволюционной химии.
53. Концепции возникновения жизни на Земле.
54. Концепция панспермии.
55. Концепция биохимической эволюции А.И.Опарина.
56. Молекулярно-генетический уровень организации жизни.
57. Воспроизводство жизни.
58. Современные проблемы биологической эволюции на Земле.
59. Развитие генной инженерии. Достижения и проблемы.
60. Учение В.И. Вернадского о биосфере.
61. Ноосфера в учении В.И. Вернадского.
62. Биogeоценозы Земли.
63. Проблемы современной экологии.
64. Проблемы истощения природных ископаемых Земли.
65. Проблемы отношений «человек – природа» на нашей планете.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепции современного естествознания. Лозовский В.Н., Лозовский С.В. – СПб.: Изд-во «Лань», 2006 г.
2. Концепции современного естествознания. Под ред. Лавриненко В.Н. и Ратникова В.П. – М.:, изд-во «Юнити», 2006 г.
3. Концепции современного естествознания. Садохин А.П. – М.: Изд-во «Юнити»: 2006 г.
4. Концепции современного естествознания. Горбачев В.В. – М.: Изд-во «ОНИКС 21 век», 2003 г.
5. Концепции современного естествознания. Лихин А.Ф. – М.: Изд-во «Проспект», 2006 г.
6. Концепции современного естествознания. Справочник. Карпенков С.Х. – М.:, Высшая школа, 2004 г.
7. Концепции современного естествознания (система основных понятий). Гранатов Г.Г. – М.: Изд-во «Флинта»: МПСИ, 2005 г.
8. Лабораторные работы по физике, ч. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Анисимов В.М. и др. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2007 г.
9. Лабораторные работы по физике, ч. 2. Электричество. Оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Анисимов В.М. и др. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008 г.

Учебное издание

Владимир Михайлович Анисимов

Галина Энгелевна Солохина

Методические указания к лабораторным работам и темы докладов по курсу «Концепции современного естествознания»