

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Кафедра общей и прикладной физики

ФИЗИКА

Методические указания к теоретическому
материалу, практическим занятиям
и заданиям, тестам, комплексу
лабораторных работ для студентов
дистанционной формы обучения

Под редакцией доцента А. А. Кулиша

Составители:
А. А. КУЛИШ
Л. В. ГРУНСКАЯ



Владимир 2013

УДК 53(07)
ББК 22.3
Ф50

Рецензент

Доктор физико-математических наук, профессор
зав. кафедрой основ нанотехнологий и теоретической физики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. Г. Рау

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Физика : метод. указания к теорет. материалу, практ. занятиям и заданиям, тестам, комплексу лаб. работ для студентов дистанц. формы обучения / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ; сост.: Л. В. Грунская, А. А. Кулиш ; под ред. доц. А. А. Кулиша. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 215 с.

Содержат комплекс учебных материалов для теоретического изучения, а также практических и лабораторных работ по таким разделам физики, как «Механика», «Молекулярная физика», «Электромагнетизм», «Колебания и волны», «Оптика». Включают всю необходимую информацию для организации самостоятельной работы студентов младших курсов дистанционной и заочной форм обучения. Лабораторный практикум представлен описанием традиционных и виртуальных лабораторных работ.

Соответствуют требованиям государственных стандартов для инженерно-технических специальностей вузов.

Рекомендованы для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 84. Табл. 7. Библиогр.: 30 назв.

УДК 53(07)
ББК 22.3

ПРЕДИСЛОВИЕ

В пособии представлены методические материалы, основная цель которых – описать в полном объеме учебный процесс по физике для студентов дистанционной и заочной форм обучения. Последовательно даются методические указания к теоретическому лекционному материалу, практическим занятиям, контрольным и расчетно-графическим работам, тестам, лабораторным работам традиционного типа, виртуальным лабораторным работам. Подробный список рекомендованной литературы и интернет-гиперссылки позволяют студенту легко ориентироваться в учебном процессе и использовать как стандартные учебные пособия, так и оригинальные учебники известных авторов, а также примеры выполнения учебных заданий.

Дистанционное обучение проводится на *e-learning* платформе *Moodle*. Данные методические материалы полностью соответствуют онлайн-курсам, созданным преподавателями кафедры общей и прикладной физики ВлГУ. Детальная информация о свойствах *Moodle* (модульной объектно-ориентированной динамической управляющей среды) как конструктора дистанционных курсов и системы управления дистанционной формой обучения содержится на сайтах <http://www.moodle.org/>, <http://thinkingdistance.org/>.

Составители методических указаний при структурировании материалов опирались на длительный опыт учебной работы преподавателей кафедры общей и прикладной физики ВлГУ, изложенный в учебных пособиях, методических рекомендациях, электронных разработках (см. список рекомендованной литературы). В основе представленных учебных материалов лежат методические указания, разработанные для студентов заочной формы обучения [23, 24]. Также учитывались сведения из других литературных источников.

ВВЕДЕНИЕ

В переводе с греческого языка *физика* (*physic*) – природа. Эта наука изучает явления окружающего мира, рассматривает фундаментальные закономерности процессов природы.

В физике есть два основных метода исследования окружающего мира – экспериментальный (опыт) и теоретический. На основе экспериментальных данных выдвигается гипотеза, а затем строится физическая теория. Процесс получения и обобщения наблюдаемых явлений природы в физике очень сложен и важен, о чем говорится в высказывании выдающегося ученого А. Пуанкаре: “Всякое обобщение есть гипотеза. Поэтому гипотезе принадлежит необходимая, никем никогда не оспаривавшаяся роль. Она должна лишь как можно скорее подвергнуться и как можно чаще подвергаться проверке” [1].

Изучение физики – сложный и многогранный процесс. Это в первую очередь обусловлено «многослойной» структурой учебного материала. Во-первых, необходимо усвоить новые разнообразные понятия, смысл центральных законов физики, место и связи изученного вопроса с другими темами и даже разделами физики. Следует сформировать образное, пространственное и другие представления об изученном вопросе, то есть в целом усвоить теоретический материал. Во-вторых, учащийся должен осознать, что изучение теории не самоцель, а инструмент для решения теоретических и практических (экспериментальных) задач. В целом это требование к студенту научиться решать задачи по физике различного типа. В-третьих, учащийся должен овладеть методикой постановки физического эксперимента и методами обработки полученных результатов. Эти навыки приобретаются при выполнении лабораторных работ.

При дистанционном изучении курса физики самоконтроль качества усвоения учебного материала приобретает первостепенное значение. Поэтому для проверки приобретенных знаний и навыков широко используются тесты и онлайн-консультации с преподавателем.

В начале каждого семестра преподавателями в их онлайн-курсах в системе *Moodle* указываются требования, необходимые для получения зачета или успешной сдачи экзамена.

Раздел 1. ИЗУЧЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Изучение теории необходимо проводить по темам приведенной ниже *программы*, используя учебные пособия, указанные в *списке рекомендуемой литературы* и материалах онлайн-курсов преподавателей в среде *Moodle*. Следует осознавать, что физика имеет дело с моделями, отражающими главные особенности предметов, явлений, процессов и т.д. (такими как абсолютно твердое тело, точечный заряд, плоско-поляризованный свет, явление полного внутреннего отражения, закон Гука и др.). Поэтому свойства этих объектов должны быть усвоены. Далее необходимо изучить центральные законы рассматриваемой темы, следствия из этих законов и частные случаи проявления фундаментальных закономерностей. В процессе самостоятельной работы следует вести *конспекты* (по темам). При этом важно, во-первых, учитывать специальную математическую форму описания явления, например интеграл по замкнутой поверхности, дифференциальное уравнение второго порядка в обыкновенных производных, систему дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных. Во-вторых, в своих записях необходимо представлять графическое отражение процессов, например вольт-амперную характеристику газового разряда, резонансную кривую, графическое изображение биений. В-третьих, в ряде случаев необходимы рисунки, схемы, отражающие смысл описанных физических процессов, например зон Френеля, колебательного контура, двойного лучепреломления.

В процессе учебной деятельности к конспекту можно обращаться неоднократно, изменяя и дополняя записи информацией, полученной на консультациях с преподавателями. Конспект, отражающий самостоятельную работу студента над теоретическим материалом, представляется на зачете или экзамене либо высылается преподавателю в электронной форме.

1.2. ПРОГРАММА

I. Механика

1. Введение. Предмет физики. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Важнейшие этапы истории физики. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Физика как культура моделирования. Компьютеры в современной физике. Роль физики в становлении инженера. Связь физики с другими науками. Успехи современной физики.

2. Некоторые сведения из математики. Роль математики в изучении физики. Функции и их производные. Интегрирование. О смысле производной и интеграла в приложении к физическим задачам. Элементы векторной алгебры: определение вектора, сложение векторов, умножение векторов, дифференцирование векторных величин. Дифференциальные уравнения. Элементарные сведения из теории вероятности.

3. Кинематика поступательного движения. Кинематика как раздел механики. Механическое движение как простейшая форма движения материи. Материальная точка (частица). Система отсчета. Инерциальные системы отсчета. Радиус-вектор. Принцип относительности Галилея. Траектория. Радиус кривизны траектории. Линейная скорость и линейное ускорение. Тангенциальное и нормальное ускорения. Связь между линейными и угловыми кинематическими величинами. Поступательное движение твердого тела.

4. Динамика поступательного движения. Динамика как раздел механики. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчета. Второй закон Ньютона и понятие силы, массы и импульса. Уравнение движения. Третий закон Ньютона и предел его применимости. Неинерциальные системы отсчета. Абсолютные и относительные скорость и ускорение. Силы инерции. Система материальных точек. Центр инерции (центр масс). Теорема о движении центра инерции.

5. Вращательное движение твердого тела. Понятие абсолютного твердого тела. Момент силы. Момент импульса. Момент инерции. Теорема Штейнера. Основной закон динамики вращательного движения. Уравнение вращательного движения твердого тела относительно

неподвижной оси (уравнение моментов). Кинетическая энергия вращающегося твердого тела. Гироскопический эффект. Свободные оси.

6. Законы сохранения. Значение и содержание законов сохранения в механике. Закон сохранения импульса. Однородность пространства. Реактивное движение. Закон сохранения момента импульса. Изотропия пространства. Работа, энергия, мощность. Связь между потенциальной энергией и силой. Понятие силового поля. Связь между кинетическими энергиями в различных системах отсчета. Консервативные и неконсервативные силы. Закон сохранения энергии в механике. Однородность времени. Консервативная и диссипативная системы. Внутренняя потенциальная энергия.

7. Элемент механики жидкостей и газов. Общие свойства жидкостей и газов. Задачи механики жидкостей и газов. Идеальная и вязкая жидкости. Уравнение Эйлера. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Системы уравнений газодинамики. Формула Пуазеля. Формула Стокса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Циркуляция скорости. Потенциальное и вихревое движения. Движение тел в жидкостях и газах. Теорема Жуковского.

8. Элементы специальной теории относительности. Принцип относительности Эйнштейна. Роль скорости света. Постулат постоянства скорости света. Преобразования Лоренца. Пространство и время в специальной теории относительности. Инварианты преобразования. Лоренцево сокращение длины и замедление времени. Релятивистский импульс. Взаимосвязь массы и энергии. Столкновение и распад частиц. Дефект масс. Энергия связи. Соотношение между полной энергией и импульсом частицы. Понятие об общей теории относительности. Границы применимости классической (ньютоновской) механики. Философское толкование пространственно-временных отношений.

II . Основы молекулярной физики и термодинамики

9. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества. Микро- и макросостояния системы. Макроскопические параметры. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Число степеней свободы молекулы. Внутренняя энергия идеального газа. Закон равнораспределения энергии. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение моле-

кулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева).

10. Элементы классической статистики. Динамические и статические закономерности в физике. Статистический метод исследования системы. Фазовое пространство, фазовая точка, фазовая ячейка. Понятие о функции распределения. Статистическое усреднение. Флуктуация и вероятность. Распределение Максвелла. Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Средние скорости молекул. Эффузия газа и молекулярные пучки. Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Распределение Максвелла – Больцмана. Распределение Гиббса.

11. Реальные газы. Силы межмолекулярного взаимодействия в газах. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа. Метастабильные состояния. Критическое состояние. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля – Томсона. Сжижение газов и получение низких температур.

12. Свойства жидкостей. Характеристика жидкого состояния. Объемные свойства жидкостей. Строение жидкостей. Ближний порядок. Поверхностное натяжение. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Условия равновесия на границе двух сред. Краевой угол. Смачивание. Капиллярные явления.

13. Свойства твердых тел. Амфорные и кристаллические тела. Упругая и пластическая деформации. Закон Гука. Кристаллическая решетка. Дальний порядок. Дефекты в кристаллах.

14. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Фазы вещества. Условия равновесия фаз. Испарение и конденсация. Плавление и кристаллизация. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Фазовая диаграмма (диаграмма состояния). Тройная точка. Полиморфизм. Фазовые переходы первого и второго рода.

15. Элементы теории столкновений. Понятие столкновения. Упругое и неупругое столкновения. Прицельное расстояние. Рассеяние частиц. Эффективное сечение рассеяния. Средняя длина свободного пробега. Принцип детального равновесия.

16. Элементы физической кинетики. Понятие о физической кинетике. Неравновесные системы. Время релаксации. Явления переноса. Диффузия. Коэффициент диффузии. Теплопроводность. Температуропроводность. Коэффициент теплопроводности. Вязкость (внутрен-

нее трение). Коэффициент вязкости. Динамическая и кинематическая вязкость.

17. Первое начало термодинамики. Статистический и термодинамический методы. Термодинамическая система. Термодинамический процесс. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота. Формулировки первого начала термодинамики. Уравнение первого начала термодинамики. Теплоемкость. Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса. Формула Майера. Работа, совершаемая газом при изопроцессах. Энтальпия (тепловая функция). Адиабатический процесс. Теплоемкость твердых тел. Недостаточность классической теории теплоемкостей газов.

18. Второе начало термодинамики. Равновесные и неравновесные состояния системы. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл). Формулировки второго начала термодинамики. Цикл Карно и его КПД для идеального газа. Тепловые двигатели и холодильные машины. Максимальный КПД теплового двигателя. Неравенство Клаузиуса. Энтропия. Статистический вес (термодинамическая вероятность). Закон возрастания энтропии. Термодинамические потенциалы и условия равновесия. Статистическое толкование второго начала термодинамики.

III. Электричество и магнетизм

19. Элементы теории поля. Скалярные и векторные поля в физике. Градиент скалярного поля. Дивергенция векторного поля. Ротор векторного поля. Оператор Гамильтона (оператор набла). Оператор Лапласа (лапласиан). Некоторые интегральные теоремы.

20. Напряженность электростатического поля в вакууме. Электрический заряд. Сохранение заряда. Дискретность заряда. Закон Кулона. Понятие электростатического поля. Силовые линии (линии напряженности). Концепции близко- и дальнего действия. Принцип суперпозиции электростатических полей. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме и ее связь с законом Кулона. Дифференциальная форма теоремы Гаусса. Применение теоремы Гаусса для расчета полей.

21. Потенциал электростатического поля в вакууме. Работа сил электростатического поля. Циркуляция напряженности электростатического поля. Ротор напряженности электростатического поля. По-

тенциальность (консервативность) электростатического поля. Потенциал. Разность потенциалов. Связь между потенциалом и напряжённостью электростатического поля. Уравнение Лапласа. Электрический диполь. Электрический момент диполя (дипольный момент). Потенциал и напряженность поля диполя. Момент сил, действующий на диполь во внешнем электрическом поле. Энергия диполя в электрическом поле.

22. Электрическое поле в диэлектриках. Свободные и связанные заряды в веществе. Сторонние заряды. Полярные и неполярные молекулы. Типы диэлектриков. Ионная, электронная и ориентационная поляризация. Поляризуемость молекулы. Поляризованность (вектор поляризации). Однородная и неоднородная поляризации. Связь поляризованности с поверхностной плотностью поляризационного заряда. Диэлектрическая восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры. Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике. Электрическое смещение (электрическая индукция) в диэлектрике. Диэлектрическая проницаемость среды. Вычисление напряженности электрического поля в диэлектрике. Граничные условия для электрического поля на границе раздела “диэлектрик – диэлектрик”. Сегнетоэлектрики.

23. Электрическое поле проводников. Распределение зарядов в проводнике. Идеальный проводник. Электростатическое поле внутри и снаружи проводника. Граничные условия на границе “проводник – вакуум”. Электрические свойства проводящей оболочки. Электростатическая защита. Метод изображений. Граничные условия на границе “проводник – диэлектрик”. Емкость удлиненного проводника, системы проводников и конденсатора. Электрическая энергия системы точечных зарядов. Энергия заряженного проводника, системы проводников и конденсатора. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии электростатического поля.

24. Постоянный электрический ток. Характеристики электрического тока: плотность тока, сила тока. Условие существования электрического тока. Сторонние силы. Разность потенциалов, напряжение, электродвижущая сила (ЭДС). ЭДС гальванического элемента. Классическая электронная теория электропроводности металлов. Законы Ома и Джоуля – Ленца в дифференциальной и интегральной форме. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Правила Кирхго-

фа. Электрический ток в сплошной среде. Заземление линий электропередач. Квазистационарные токи. Разрядка и зарядка конденсатора. Недостаточность классической электронной теории электропроводности. Границы применимости закона Ома.

25. Элементы физической электроники. Электрический ток в вакууме. Электронная эмиссия. Работа выхода электронов из металла. Виртуальный катод. Первеанс электронного пучка. Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Работа ионизации. Потенциал ионизации. Ударная ионизация. Несамостоятельный газовый разряд. Самостоятельный газовый разряд. Вольт-амперная характеристика газового разряда. Виды разрядов.

26. Плазма. Понятие о плазме. Способы создания плазмы. Квазинейтральность плазмы. Электропроводность плазмы. Дебаевский радиус (дебаевская длина) экранирования. Плазменная частота. Низкотемпературная плазма. МГД-преобразование энергии. Высокотемпературная плазма. Перспектива осуществления управляемого термоядерного синтеза. Вклады ученых разных стран в изучение проблемы управляемого термоядерного синтеза.

27. Магнитное поле в вакууме. Закон Ампера. Магнитная индукция. Закон Био и Савара (закон Био – Савара – Лапласа). Понятие магнитного поля. Принцип суперпозиции магнитных полей. Сила Лоренца и сила Ампера. Магнитное поле прямолинейного и кругового токов. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока (теорема о циркуляции магнитного поля) в вакууме. Применение закона полного тока для расчета магнитных полей. Магнитное поле длинного соленоида и тороида. Определение единицы силы тока – ампера. Вихревое поле движущегося заряда. Инвариантность электрического заряда. Магнитное поле как релятивистский эффект. Виток с током в магнитном поле. Магнитный момент. Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку с током во внешнем магнитном поле.

28. Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях. Движение заряженной частицы в электрическом поле. Движение заряженной частицы в совместном электрическом и магнитных полях. Эффект Холла. МГД-генератор. Масс-спектрограф и масс-спектрометр. Ускорители заряженных частиц.

29. Магнитное поле в веществе. Понятие магнитного момента атома. Микро- и макроток. Молекулярные токи. Намагниченность (вектор намагничивания). Однородное и неоднородное намагничивание. Связь намагниченности с линейной плотностью поверхностного молекулярного тока. Магнитная восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры. Закон полного тока (теорема о циркуляции магнитного поля) в веществе. Напряженность магнитного поля в веществе. Магнитная проницаемость среды. Индукция магнитного поля в веществе. Граничные условия для магнитного поля на границе раздела двух сред. Типы магнетиков. Точка Кюри. Домены. Кривая намагничивания.

30. Электромагнитная индукция. Опыт Фарадея. Магнитный поток. ЭДС индукции. Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея). Вывод основного закона электромагнитной индукции из закона сохранения энергии, а также на основе электронной теории. Правило Ленца (закон Ленца). Явление самоиндукции. Индуктивность. Индуктивность длинного соленоида. Токи замыкания и размыкания цепи. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии магнитного поля. Флюксметр.

IV. Колебания и волны

31. Механические колебания. Свободные (собственные) и вынужденные колебания. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение. Характеристики гармонических колебаний. Понятие о гармоническом осцилляторе. Энергия гармонических колебаний. Сложение одинаково направленных (скалярных) гармонических колебаний. Метод векторной диаграммы. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных (векторных) гармонических колебаний. Фигуры Лиссажу. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Аперриодический процесс. Частота и коэффициент затухания. Логарифмический декремент затухания и добротность колебательной системы. Изохронность колебаний. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза при вынужденных механических колебаниях. Механический резонанс. Резонансные кривые. Соотношение между фазами вынуждающей силы и скорости при механическом резонансе.

32. Механические волны. Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Волновое уравнение и его решение. Гармонические волны и их характеристики. Ударные волны. Принцип суперпозиции волн и граница его применимости. Фазовая скорость и дисперсия волн. Волновой пакет и групповая скорость. Понятие о когерентности. Интерференция волн. Стоячие волны. Энергия и поток энергии упругой волны. Вектор Умова. Эффект Доплера для звуковых волн. Ультразвук.

33. Электромагнитные колебания. Дифференциальное уравнение колебаний в колебательном контуре и его решение. Дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний и его решение. Частота и коэффициент затухания электромагнитного колебания. Логарифмический декремент затухания и добротность контура. Дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза при вынужденных электромагнитных колебаниях. Резонанс в колебательном контуре. Резонансные кривые для напряжения и силы тока. Переменный ток.

34. Электромагнитные волны. Фарадеевская и максвелловская трактовки явления электромагнитной индукции. Ток смещения. Электромагнитное поле. Система уравнений Максвелла. Волновое уравнение для электромагнитного поля и его решение. Скорость распространения электромагнитных волн в средах. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия и поток энергии электромагнитных волн. Вектор Пойнтинга. Импульс электромагнитного поля. Излучение диполя. Диаграмма направленности. Эффект Доплера для электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн.

V. Оптика

35. Распространение света через границу двух сред. Электромагнитная природа света. Принцип Гюйгенса. Закон отражения и преломления. Абсолютный и относительный показатели преломления. Полное внутреннее отражение. Световоды. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики. Оптические инструменты.

36. Интерференция света. Монохроматические и немонхроматические волны. Понятие о разложении Фурье. Принцип суперпозиции и интенсивность при сложении световых волн. Когерентность световых волн. Время и длина когерентности. Оптическая длина пути. Оп-

тическая разность хода. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Полосы равной толщины и равного наклона. Многолучевая интерференция. Способы получения когерентных лучей. Интерферометры. Излучение Вавилова – Черенкова.

37. Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля. Дифракция Френеля от круглого отверстия и круглого диска. Дифракция Френеля от края полуплоскости. Спираль Корню. Дифракция Фраунгофера от бесконечно длинной прямой щели. Дифракция от одномерной дифракционной решетки. Дифракция на двухмерной дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических инструментов. Дифракция на трехмерной дифракционной решетке. Понятие о голографии.

38. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Степень поляризации. Поляризация света при преломлении и отражении. Закон Брюстера. Поляризация при двойном лучепреломлении. Обыкновенный и необыкновенный лучи. Оптическая ось кристалла. Поляроиды и поляризационные призмы. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса. Полуволновые и четвертьволновые пластинки. Искусственная оптическая анизотропия. Оптическая активность вещества. Эффект Фарадея.

39. Дисперсия света. Затруднения в электромагнитной теории Максвелла. Нормальная и аномальная дисперсии. Методы наблюдения дисперсии. Призматический и дифракционный спектры. Электронная теория дисперсии света. Поглощение света. Закон Бугера. Цвета тел и спектры поглощения.

1.3. ВОПРОСЫ, ВХОДЯЩИЕ В ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ

I. Механика

1. Методы физического исследования. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики.

2. Связь физики с другими науками. Успехи современной физики.

3. Механическое движение как простейшая форма движения материи. Система отсчета. Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея. Радиус-вектор.

4. Материальная точка (частица). Траектория. Радиус кривизны траектории. Линейная скорость и линейное ускорение. Поступательное движение твердого тела.
5. Тангенциальное и нормальное ускорение. Связь между линейными и угловыми кинематическими величинами.
6. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчета. Второй закон Ньютона и понятие силы, массы и импульса. Уравнение движения.
7. Неинерциальные системы отсчета. Абсолютные и относительные скорость и ускорение. Силы инерции.
8. Система материальных точек. Центр инерции (центр масс). Теорема о движении центра инерции.
9. Понятие абсолютно твердого тела. Момент инерции тела.
10. Момент силы. Момент импульса. Основной закон динамики вращательного движения. Уравнение вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси.
11. Теорема Штейнера.
12. Гироскопический эффект. Свободные оси.
13. Закон сохранения импульса и третий закон Ньютона.
14. Закон сохранения момента импульса.
15. Работа и энергия в механике. Энергия кинетическая и потенциальная.
16. Связь между потенциальной энергией и силой. Понятие силового поля.
17. Закон сохранения механической энергии.
18. Консервативные и неконсервативные силы. Консервативная и диссипативная системы.
19. Задачи механики жидкостей и газов.
20. Уравнение Эйлера.
21. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли.
22. Система уравнений газодинамики.
23. Циркуляция скорости. Потенциальное и вихревое движения. Теорема Жуковского.
24. Ламинарный и турбулентный режимы течения.
25. Принцип относительности Эйнштейна. Роль скорости света. Постулат постоянства скорости света. Преобразования Лоренца.

26. Пространство и время в специальной теории относительности. Инварианты преобразования.
27. Лоренцово сокращение длины и замедление времени.
28. Релятивистский импульс. Взаимосвязь массы и энергии.
29. Столкновение и распад частиц. Дефект масс. Энергия связи.
30. Соотношение между полной энергией и импульсом частиц.

II. Основы молекулярной физики и термодинамики

1. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Макроскопические параметры системы.
2. Внутренняя энергия идеального газа. Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии.
3. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.
4. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева).
5. Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический метод исследования системы. Понятие о функции распределения.
6. Фазовое пространство. Фазовая точка, фазовая ячейка. Статистическое усреднение.
7. Распределение Максвелла. Средние скорости молекул.
8. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.
9. Статистика Максвелла – Больцмана. Распределение Гиббса.
10. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реальных газов.
11. Метастабильное состояние. Критическое состояние.
12. Внутренняя энергия реального газа.
13. Эффект Джоуля – Томсона. Сжижение газов и получение низких температур.
14. Характеристика жидкого состояния. Ближний порядок.
15. Поверхностное натяжение. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Смачивание и капиллярные явления.
16. Упругая и пластическая деформация твердых тел. Закон Гука. Кристаллическая решетка. Дальний порядок. Монокристаллы и поликристаллы.

17. Фазы вещества. Испарение и конденсация. Плавление и кристаллизация. Фазовые переходы первого и второго рода.
18. Понятие столкновения. Упругое и неупругое столкновение.
19. Прицельное расстояние. Эффективное сечение рассеяния. Средняя длина свободного пробега.
20. Явление переноса – диффузия.
21. Явление переноса – теплопроводность.
22. Явление переноса – вязкость.
23. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота. Уравнение первого начала термодинамики.
24. Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса. Работа, совершаемая газом при изопроцессах.
25. Адиабатический процесс.
26. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл).
27. Цикл Карно и его КПД для идеального газа.
28. Принцип действия теплового двигателя и холодильной машины.
29. Энтропия. Закон возрастания энтропии.
30. Статистический вес (термодинамическая вероятность). Статистическое толкование второго начала термодинамики.

III. Электричество и магнетизм

1. Закон Кулона. Напряженность электростатического поля. Понятие электростатического поля. Концепции близко- и дальнего действия. Принцип суперпозиции электрических полей.
2. Поток напряженности. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме.
3. Применение теоремы Гаусса для расчета полей.
4. Работа сил электростатического поля. Циркуляция напряженности электростатического поля.
5. Потенциал. Разность потенциалов. Связь между потенциалом и напряженностью электростатического поля.
6. Свободные и связанные заряды в веществе. Типы диэлектриков. Ионная, электронная и ориентационная поляризация.
7. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры.

8. Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике. Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость среды. Напряженность электрического поля в диэлектрике.

9. Граничные условия для электрического поля на границе раздела “диэлектрик – диэлектрик”.

10. Распределение зарядов в проводнике. Электростатическое поле внутри и снаружи проводника. Граничные условия на границе “проводник – вакуум”.

11. Емкость уединенного проводника, системы проводников и конденсатора.

12. Энергия заряженных уединенного проводника, системы проводников и конденсатора. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии электростатического поля.

13. Характеристики электрического тока и условия его существования. Разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение.

14. Классическая электронная теория электропроводности металлов и ее недостаточность.

15. Вывод законов Ома и Джоуля – Ленца из электронных представлений.

16. Ионизация молекул и рекомбинация ионов. Работа ионизации. Ударная ионизация.

17. Несамостоятельный и самостоятельный газы и разреженные газы.

18. Понятие о плазме. Способы создания плазмы. Квазинейтральность плазмы. Дебаевский радиус экранирования. Плазменная частота.

19. Низкотемпературная плазма. МГД-преобразование энергии.

20. Высокотемпературная плазма. Перспектива осуществления управляемого термоядерного синтеза.

21. Закон Ампера. Магнитная индукция. Закон Био и Савара. Понятие магнитного поля. Принцип суперпозиции магнитных полей.

22. Магнитное поле прямолинейного и круговых токов.

23. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока. Магнитное поле длинного соленоида и тороида.

24. Магнитное взаимодействие токов и единица силы тока – ампер.

25. Инвариантность электрического заряда. Вихревое поле движущегося заряда. Магнетизм как релятивистский эффект.

26. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.
27. Эффект Холла. Принцип действия ускорителей заряженных частиц.
28. Понятие магнитного момента атома.
29. Микро- и макротоки. Молекулярные токи. Магнитная восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры.
30. Закон полного тока для магнитного поля в веществе. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Индукция магнитного поля в веществе.
31. Граничные условия для магнитного поля на границе раздела двух сред.
32. Типы магнетиков. Кривая намагничивания. Точка Кюри. Домены.
33. Опыт Фарадея. Магнитный поток. ЭДС индукции. Основной закон электромагнитной индукции. Правило Ленца.
34. Самоиндукция и взаимная индукция. Индуктивность и взаимная индуктивность. Токи размыкания и замыкания.
35. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии магнитного поля.

IV. Колебания и волны

1. Свободные и вынужденные колебания. Гармонические механические колебания и их характеристики.
2. Энергия гармонических механических колебаний. Понятие о гармоническом осцилляторе.
3. Сложение одинаково направленных гармонических колебаний. Биения.
4. Сложение взаимно перпендикулярных гармонических колебаний. Фигуры Лиссажу.
5. Затухающие механические колебания. Частота, коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания механических колебаний.
6. Вынужденные механические колебания. Амплитуда и фаза при вынужденных механических колебаниях.

7. Механический резонанс. Резонансные кривые. Соотношения между фазами вынуждающей силы и скорости при механическом резонансе.

8. Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Волновое уравнение и его решение. Гармонические волны и их характеристики.

9. Фазовая скорость и дисперсия волн. Волновой пакет и групповая скорость.

10. Понятие о когерентности. Интерференция волн. Стоячие волны.

11. Колебательный контур. Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики.

12. Затухающие электромагнитные колебания. Частота, коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания электромагнитных колебаний. Добротность колебательного контура.

13. Вынужденные электромагнитные колебания. Амплитуда и фаза вынужденных электромагнитных колебаний.

14. Фарадеевская и максвелловская трактовки явления электромагнитной индукции. Ток смещения.

15. Электромагнитное поле. Система уравнений Максвелла.

16. Волновое уравнение для электромагнитного поля и его решение. Скорость распространения электромагнитных волн в средах.

17. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия и поток энергии электромагнитных волн. Вектор Пойнтинга. Импульс электромагнитного поля.

V. Оптика

1. Электромагнитная природа света. Принцип Гюйгенса. Закон отражения и преломления. Абсолютный и относительный показатели преломления. Полное внутреннее отражение. Световоды.

2. Когерентность и монохроматичность световых волн. Время и длина когерентности.

3. Оптическая длина пути. Оптическая разность хода. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников.

4. Полосы равной толщины и равного наклона.

5. Излучение Вавилова – Черенкова.

6. Многолучевая интерференция.

7. Понятие о голографии.
8. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске.
9. Дифракция Фраунгофера от бесконечно длинной прямой щели.
10. Дифракция Фраунгофера на одномерной дифракционной решетке.
11. Естественный и поляризованный свет. Поляризация при отражении и преломлении. Закон Брюстера.
12. Поляризация при двойном лучепреломлении. Обыкновенный и необыкновенный лучи. Оптическая ось кристалла. Поляризационные призмы. Закон Малюса.
13. Оптическая активность вещества. Эффект Фарадея.
14. Затруднения в электромагнитной теории Максвелла. Нормальная и аномальная дисперсии. Методы наблюдения дисперсии.
15. Электронная теория дисперсии света.
16. Поглощение света. Цвета тел и спектр поглощения.

Раздел 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

2.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ

Решение задач по физике состоит из четырех основных этапов: 1) разворачивание условия задачи; 2) предложение предполагаемого метода решения; 3) реализация предполагаемого метода решения; 4) получение результатов и представление их в требуемой форме.

1. На первом этапе устанавливается число случаев, процессов, тел и т.д., введенных в условие задачи. В дальнейшем это, возможно, будет определять число уравнений, законов, соотношений связей и т.д. Вводится обозначение всех физических величин, имеющих численное значение и играющих важную роль по смыслу задачи. Это относится и к тем величинам и функциональным связям, которые следует найти. Для более глубокого представления условия задачи необходимо сделать рисунок, график или диаграмму состояний и т.д.

2. После проработки условия задачи на основе соответствующих законов физики и известных методов решения выдвигается закон, важное соотношение или характерный прием, которые, как предполагается, позволят решить задачу. Намеченный метод решения может состоять из нескольких соотношений или уравнений.

3. При реализации выбранного метода решения выписываются уравнения или соотношения с введенными обозначениями. Далее записанные выражения преобразуются: преобразуется подинтегральное выражение, проецируются векторные уравнения на оси координат, разлагается вектор (векторное поле) по ортонормированному базису и т.д. Производится решение преобразованных выражений.

4. На последнем этапе вычисляются необходимые величины, коэффициенты или выводятся требуемые функциональные зависимости. При этом учитываются размерность физических величин, множители приставок и переводные коэффициенты внесистемных единиц измерения. Проводится анализ полученного решения в сравнении с известными стандартными случаями, литературными и справочными данными. При необходимости анализ дополняется соответствующим графиком, диаграммой состояний, гистограммой и т.д.

2.2. ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Кинематика поступательного движения
2. Кинематика вращательного движения
3. Динамика поступательного движения
4. Динамика вращательного движения
5. Законы сохранения
6. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа
7. Элементы классической статистики
8. Элементы физической кинетики
9. Первое и второе начала термодинамики
10. Напряженность и потенциал электростатического поля в вакууме
11. Применение теоремы Гаусса для расчета электростатических полей
12. Электрическое поле в проводниках и диэлектриках
13. Постоянный электрический ток
14. Магнитное поле в вакууме и веществе
15. Электромагнитная индукция
16. Механические колебания и волны
17. Электромагнитные колебания и волны
18. Геометрическая оптика
19. Волновая оптика

2.3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ

I. Механика

Кинематика

1. Радиус-вектор частицы изменяется со временем по закону $\vec{r} = at\vec{e}_x - bt^2\vec{e}_y$, где a и b – положительные постоянные. Найти:
 - а) скорость \vec{V} и ускорение \vec{W} , а также их модули;
 - б) зависимость от времени угла α между векторами \vec{V} и \vec{W} ;
 - в) уравнение траектории частицы $y(x)$.

Дано:

$$\vec{r} = at\vec{e}_x - bt^2\vec{e}_y$$

$$a > 0, b > 0$$

а) \vec{V}, \vec{W}, V, W – ?

б) $\alpha(t)$ – ?

в) $y(x)$ – ?

Решение:

а) Как известно, для определения скорости частицы необходимо взять первую производную по времени от ее радиус-вектора. Поэтому

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt} = a\vec{e}_x - 2bt\vec{e}_y. \quad (1)$$

Для определения ускорения частицы необходимо взять вторую производную по времени от ее радиус-вектора. Поэтому

$$\vec{W} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -2b\vec{e}_y. \quad (2)$$

Из выражения (1) модуль скорости определяется по известным компонентам вектора скорости: $V_x = a$; $V_y = -2bt$, $V_z = 0$.

$$\text{Отсюда } V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} = \sqrt{a^2 + 4b^2t^2}.$$

Из выражения (2) модуль ускорения определяется по известным компонентам вектора ускорения: $W_x = 0$, $W_y = -2b$, $W_z = 0$.

$$\text{Отсюда } W = |W_y| = 2b.$$

б) Для определения зависимости от времени угла $\alpha(t)$ между векторами \vec{V} и \vec{W} выразим скалярное произведение этих векторов двояким образом:

$$(\vec{V} \cdot \vec{W}) = V \cdot W \cdot \cos\alpha(t) = (\sqrt{a^2 + 4b^2t^2}) \cdot 2b \cdot \cos\alpha(t); \quad (3)$$

$$(\vec{V} \cdot \vec{W}) = V_x \cdot W_x + V_y \cdot W_y + V_z \cdot W_z = (-2bt) \cdot (-2b) = 4b^2t. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) для зависимости $\alpha(t)$ получим
$$\alpha(t) = \arccos \frac{2bt}{\sqrt{a^2 + 4b^2t^2}}.$$

в) Из выражения для радиус-вектора следует: $x(t) = at$ (1), $y(t) = -bt^2$ (2), $z = 0$ (3).

Отсюда, исключая время t из выражений (1) и (2), получим уравнение траектории частицы: $y = -\frac{b}{a^2}x^2$ в плоскости $z = 0$.

$$\text{Ответ: а) } \vec{V} = a\vec{e}_x - 2bt\vec{e}_y; \vec{W} = -2b\vec{e}_y; V = \sqrt{a^2 + 4b^2t^2}; W = 2b;$$

$$\text{б) } \alpha(t) = \arccos \frac{2bt}{\sqrt{a^2 + 4b^2t^2}}; \text{ в) } y_x = -\frac{b}{a^2}x^2.$$

2. Частица движется по окружности радиусом $R = 2$ м, и путь изменяется со временем по закону $S = At^3$, где $A = 2$ м/с³. Найти: а) момент времени t_0 , при котором нормальное ускорение W_n будет равно тангенциальному W_τ ; б) полное ускорение в этот момент времени.

Дано:

$$R = 2 \text{ м}$$

$$S = At^3$$

$$A = 2 \text{ м/с}^3$$

$$W_n = W_\tau$$

а) t_0 — ?

б) W — ?

Решение:

а) Выражения для нормального ускорения, тангенциального ускорения и полного ускорения имеют вид

$$W_n = \frac{V^2}{R} = \left(\frac{dS}{dt}\right)^2 \cdot \frac{1}{R}, W_\tau = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2}, W = \sqrt{W_n^2 + W_\tau^2}.$$

Из условия задачи получим уравнение относительно t_0 : $\left(\frac{dS}{dt}\right)^2 \cdot \frac{1}{R} = \frac{d^2S}{dt^2}$ или $(3At_0^2)^2 \cdot \frac{1}{R} = 6At_0$. Отсюда

$$t_0 = \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{R}{A}\right)^{1/3} = 0,873 \text{ с.}$$

б) Для полного ускорения из условия задачи получим

$$W = \sqrt{2W_\tau^2} = \sqrt{2\left(\frac{d^2S}{dt^2}\right)^2} = \sqrt{2} \cdot 6At_0 = 14,8 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: а) $t_0 = 0,873$ с; б) $W = 14,8$ м/с².

3. Тело брошено с вышки в горизонтальном направлении со скоростью $V_0 = 30$ м/с. Найти значения следующих величин через две секунды ($\tau = 2$ с): а) скорости V , тангенциального ускорения W_τ , нормального ускорения W_n ; б) радиуса кривизны траектории R .

Дано:

$$V_0 = 30 \text{ м/с}$$

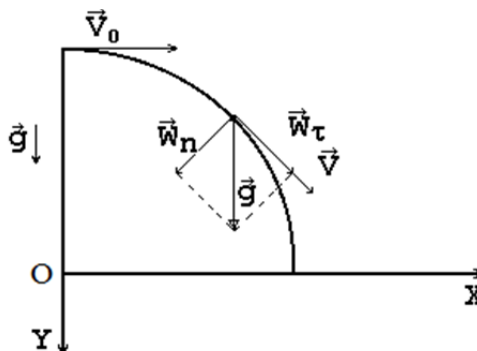
$$\tau = 2 \text{ с}$$

а) V, W_τ, W_n — ?

б) R — ?

Решение:

а) Траектория движения тела и направление векторов $\vec{V}, \vec{W}_n, \vec{W}_\tau, \vec{g}$ через время τ показаны на рисунке.



Введем систему координат XOY , как показано на рисунке, чтобы учесть независимость движений тела по горизонтали и вертикали. Проекция вектора скорости на ось OX V_x остается всегда постоянной и равной V_0 . Проекция вектора скорости на ось OY V_y растет со временем по закону $V_y = gt$, так как вдоль оси OY тело движется равноускоренно с ускорением свободного падения g . Поэтому для модуля скорости тела получим

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{V_0^2 + g^2 t^2}. \quad (1)$$

Через две секунды значение модуля скорости:

$$V = \sqrt{V_0^2 + g^2 t^2} = \sqrt{900 + 385} = 35,8 \text{ м/с.}$$

Для вычисления тангенциальной составляющей ускорения W_τ воспользуемся формулой, полученной с учетом (1): $W_\tau = \frac{dV}{dt} = \frac{g^2 t}{\sqrt{V_0^2 + g^2 t^2}}$.

Следовательно, через две секунды $W_\tau = \frac{g^2 t}{\sqrt{V_0^2 + g^2 t^2}} = \frac{(9,81)^2 \cdot 2}{35,8} = 5,38 \text{ м/с}^2$.

Из рисунка к задаче видно, что нормальную составляющую ускорения W_n можно вычислить по теореме Пифагора, т. к. полное ускорение равно \vec{g} .

$$\text{Следовательно, имеем } W_n = \sqrt{g^2 - W_\tau^2} = \sqrt{(9,81)^2 - (5,38)^2} = 8,2 \text{ м/с}^2.$$

б) Радиус кривизны траектории в рассматриваемой точке движения найдем из формулы $W_n = \frac{V^2}{R}$. Отсюда $R = \frac{V^2}{W_n} = \frac{(35,8)^2}{8,2} = 156 \text{ м.}$

Ответ: а) $V = 35,8 \text{ м/с}$; $W_\tau = 5,38 \text{ м/с}^2$; $W_n = 8,2 \text{ м/с}^2$; б) $R = 156 \text{ м.}$

Динамика

4. Система состоит из частицы 1 массой 1,0 г, расположенной в точке с координатами (1, 1, 1) м, частицы 2 массой 2,0 г, расположенной в точке с координатами (-2, 2, 2) м, частицы 3 массой 3,0 г, расположенной в точке с координатами (-1, 3, -2) м, частицы 4 массой 4,0 г, расположенной в точке с координатами (3, -3, 3) м. Найти радиус-вектор \vec{r}_c центра масс системы и его модуль.

Дано:

$$m_1 = 1,0 \text{ г}$$

$$m_2 = 2,0 \text{ г}$$

$$m_3 = 3,0 \text{ г}$$

$$m_4 = 4,0 \text{ г}$$

$$\vec{r}_1 = 1 \cdot \vec{e}_x + 1 \cdot \vec{e}_y + 1 \cdot \vec{e}_z, \text{ м}$$

$$\vec{r}_2 = -2 \cdot \vec{e}_x + 2 \cdot \vec{e}_y + 2 \cdot \vec{e}_z, \text{ м}$$

$$\vec{r}_3 = -1 \cdot \vec{e}_x + 3 \cdot \vec{e}_y - 2 \cdot \vec{e}_z, \text{ м}$$

$$\vec{r}_4 = 3 \cdot \vec{e}_x - 3 \cdot \vec{e}_y + 3 \cdot \vec{e}_z, \text{ м}$$

$$\vec{r}_c - ?$$

$$|\vec{r}_c| - ?$$

Решение:

Положение центра масс системы опре-

деляется выражением $\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$, где m_i – масса

i -й частицы системы; \vec{r}_i – радиус-вектор i -й частицы системы.

Отсюда, для радиус-вектора центра масс рассматриваемой системы, получим

$$\begin{aligned} \vec{r}_c &= \frac{m_1 \vec{r}_1 + \dots + m_4 \vec{r}_4}{m_1 + \dots + m_4} = \frac{1,0(1 \cdot \vec{e}_x + 1 \cdot \vec{e}_y + 1 \cdot \vec{e}_z) + 2,0(-2 \cdot \vec{e}_x + 2 \cdot \vec{e}_y + 2 \cdot \vec{e}_z)}{1,0 + 2,0 + 3,0 + 4,0} + \\ &+ \frac{3,0(-1 \cdot \vec{e}_x + 3 \cdot \vec{e}_y - 2 \cdot \vec{e}_z) + 4,0(3 \cdot \vec{e}_x - 3 \cdot \vec{e}_y + 3 \cdot \vec{e}_z)}{1,0 + 2,0 + 3,0 + 4,0} = \frac{6 \cdot \vec{e}_x + 2 \cdot \vec{e}_y + 11 \cdot \vec{e}_z}{10} = \\ &= 0,6 \cdot \vec{e}_x + 0,2 \cdot \vec{e}_y + 1,1 \cdot \vec{e}_z, \text{ м.} \end{aligned}$$

Для модуля радиус-вектора центра масс системы следует:

$$|\vec{r}_c| = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} = \sqrt{0,36 + 0,04 + 1,21} = 1,27, \text{ м.}$$

Ответ: $\vec{r}_c = 0,6 \cdot \vec{e}_x + 0,2 \cdot \vec{e}_y + 1,1 \cdot \vec{e}_z, \text{ м}$; $|\vec{r}_c| = 1,27, \text{ м}$.

5. На горизонтальной плоскости лежит доска массы $m_1 = 1 \text{ кг}$, а на доске – брусок массы $m_2 = 2 \text{ кг}$. Коэффициент трения между бруском и доской $\mu_1 = 0,25$, между доской и горизонтальной плоскостью – $\mu_2 = 0,5$. С каким минимальным ускорением должна двигаться доска, чтобы брусок начал с нее соскальзывать? Какую горизонтальную силу F_0 следует при этом приложить к доске?

Дано:

$$m_1 = 1 \text{ кг}$$

$$m_2 = 2 \text{ кг}$$

$$\mu_1 = 0,25$$

$$\mu_2 = 0,5$$

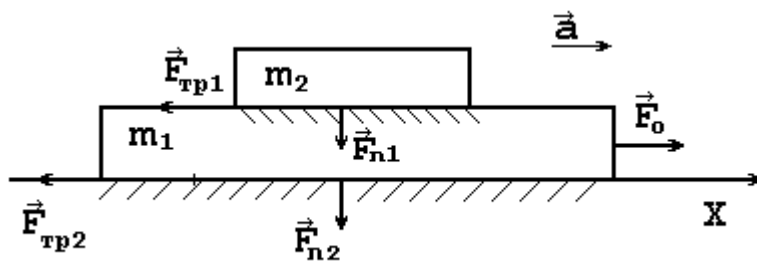
$$a_m - ?$$

$$F_0 - ?$$

Решение:

Движение доски и бруска одномерное и происходит вдоль оси OX , как показано на рисунке. Поэтому для решения задачи достаточно воспользоваться проекцией уравнения 2-го закона Ньютона на ось OX (как для бруска, так и для доски).

Брусок в горизонтальном направлении движется с ускорением без



проскальзывания под действием силы трения покоя со стороны поверхности доски. По мере роста ускорения доски растет и величина силы трения

покоя. Когда она достигает предельной величины, равной силе трения скольжения $F_{\text{тр}1}$, брусок начинает соскальзывать с доски. В этом случае из 2-го закона Ньютона получим

$$m_2 a_m = F_{\text{тр}1} = \mu_1 F_{n1}, \quad (1)$$

где F_{n1} – сила нормального давления бруска на поверхность доски.

Третий закон Ньютона дает

$$F_{n1} = m_2 g. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует: $a_m = \mu_1 g = 0,25 \cdot 9,81 = 2,45 \text{ м/с}^2$.

На доску действуют в горизонтальной плоскости силы \vec{F}_0 , $\vec{F}_{\text{тр}1}$ и $\vec{F}_{\text{тр}2}$, как показано на рисунке. Уравнение движения доски в этом случае имеет вид

$$m_1 \cdot a_m = F_0 - F_{\text{тр}1} - F_{\text{тр}2}, \quad (3)$$

где $F_{\text{тр}2} = \mu_2 F_{n2}$ – сила трения скольжения между доской и горизонтальной плоскостью; F_{n2} – сила нормального давления доски с бруском на горизонтальную плоскость. Третий закон Ньютона в этом случае дает

$$F_{n2} = (m_1 + m_2) \cdot g. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) получим

$$F_0 = m_1 \mu_1 g + m_2 \mu_1 g + \mu_2 (m_1 + m_2) g = (m_1 + m_2) (\mu_1 + \mu_2) g = 22 \text{ Н.}$$

Ответ: $a_m = 2,45 \text{ м/с}^2$; $F_0 = 22 \text{ Н.}$

Вращательное движение

6. Сила с компонентами $(2, -1, 4)$, Н приложена к точке с координатами $(-3, 2, 1)$, м. Найти:

- момент силы \vec{M} относительно начала системы координат;
- модуль момента силы M ;
- проекцию M_z момента силы \vec{M} на ось OZ .

Дано:

$$\vec{F} = 2 \cdot \vec{e}_x - 1 \cdot \vec{e}_y + 4 \cdot \vec{e}_z, \text{ Н}$$

$$\vec{r} = -3 \cdot \vec{e}_x + 2 \cdot \vec{e}_y + 1 \cdot \vec{e}_z, \text{ м}$$

Решение:

По определению момент силы относительно начала системы координат – векторное произведение радиус-вектора \vec{r} и силы \vec{F} . Следовательно

$$\vec{M} - ?$$

$$M - ?$$

$$M_z - ?$$

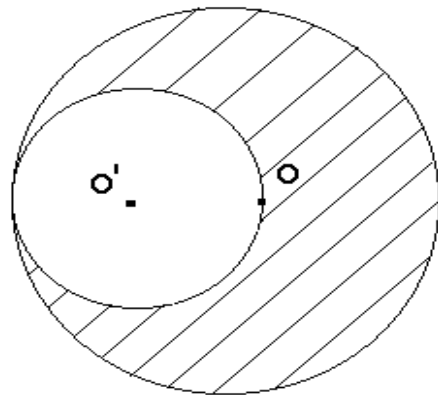
$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}] = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = (yF_x - zF_y)\vec{e}_x + (zF_x - xF_z)\vec{e}_y + (xF_y - yF_x)\vec{e}_z = 10\vec{e}_x + 14\vec{e}_y - 1\vec{e}_z, \text{ Нм}, \quad (1)$$

z – компонента вектора \vec{M} – и есть проекция M_z момента силы на ось OZ .

Следовательно $M_z = -1$, Нм. Модуль момента силы \vec{M} получится из выражения (1): $M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} = \sqrt{100 + 196 + 1} = 17,2$, Нм.

Ответ: $\vec{M} = 10\vec{e}_x + 14\vec{e}_y - 1\vec{e}_z$, Нм; $M = 17,2$ Нм; $M_z = -1$ Нм.

7. Во сколько раз уменьшится момент инерции однородного сплошного диска относительно оси, проходящей через его центр инерции (точка O), и перпендикулярной к плоскости диска, если сделать круглый дисковый вырез, как показано на рисунке?



Решение:

Момент инерции – величина аддитивная. Поэтому момент инерции I_3 диска с вырезом относительно точки O равен разности момента инерции диска $I_1(O)$ относительно точки O и момента инерции малого диска $I_2(O)$, соответствующего вырезанной части, также относительно точки O , т. е. $I_3 = I_1(O) - I_2(O)$.

В задаче необходимо найти отношение $\frac{I_1(O)}{I_3}$. Обозначим массу диска через m , а радиус диска через R . Тогда масса вырезанной части $\frac{m}{4}$,

а радиус $\frac{R}{2}$. Как известно, момент инерции диска $I_1(O)$ относительно

оси симметрии: $I_1(O) = \frac{mR^2}{2}$. Для вычисления момента инерции $I_2(O)$ используем теорему Штейнера: $I_2(O) = I_2(O') + \frac{mR^2}{4 \cdot 4}$, где $I_2(O')$ – момент инерции малого диска, соответствующего вырезанной части, относительно оси симметрии этого диска, проходящей через точку O' . Окончательно $I_2(O) = \frac{mR^2}{4 \cdot 4} \cdot \frac{1}{2} + \frac{mR^2}{4 \cdot 4} = \frac{3}{32}mR^2$. Таким образом, искомое отношение: $\frac{I_1(O)}{I_3} = \frac{I_1(O)}{I_1(O) - I_2(O)} = \frac{16}{13}$.

Ответ: момент инерции диска после сделанного выреза уменьшается в $\frac{16}{13}$ раз.

8. Тонкий однородный обруч массой $m = 2$ кг и радиусом $R = 1$ м вращается вокруг оси симметрии перпендикулярной к плоскости обруча, делая $n_0 = 120$ об/мин. Под действием постоянной касательной к поверхности обруча силы $F_T = 4$ Н обруч тормозится и останавливается. Определить время торможения t_T и число оборотов N_T , которое сделает обруч от начала торможения до остановки.

Дано:
 $m = 2$ кг
 $R = 1$ м
 $n_0 = 120$ об/мин
 $F_T = 4$ Н

 $t_T - ?$
 $N_T - ?$

Решение:

Для вращающегося обруча, на который действует тормозящий момент сил $M_T = F_T R$, уравнение вращательного движения имеет вид

$$I \cdot |\varepsilon| = M_T = F_T R, \quad (1)$$

где I – момент инерции обруча; ε – угловое ускорение.

Момент инерции тонкого однородного обруча: $I = mR^2$. Угловое ускорение постоянно, так как тормозящий момент сил не изменяется. Следовательно, угловая скорость ω связана с угловым ускорением формулой

$$\omega = \omega_0 - |\varepsilon| \cdot t, \quad (2)$$

где ω_0 – начальная угловая скорость обруча. Знак минус в выражении (2) учитывает, что угловое ускорение отрицательно, т. е. вращение равнозамедленное. Число оборотов N связано с углом поворота обруча φ и угловым ускорением соотношением

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\omega_0 t}{2\pi} - \frac{|\varepsilon| \cdot t^2}{2 \cdot 2\pi}. \quad (3)$$

В конце времени торможения угловая скорость обруча равна нулю, и из формул (1) и (2) получим

$$t_T = \frac{\omega_0}{|\varepsilon|} = \frac{2\pi n_0}{|\varepsilon|} = \frac{2\pi n_0 m R}{F_T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 2 \cdot 1}{60 \cdot 4} = 6,28 \text{ с.}$$

Для числа оборотов N_T за время торможения из выражения (3) следует

$$N_T = \frac{|\varepsilon| t_T^2}{2 \cdot 2\pi} = \frac{2 \cdot (6,28)^2}{2 \cdot 2 \cdot 3,14} = 12,56 \text{ об.}$$

Ответ: $t_T = 6,28 \text{ с}$; $N_T = 12,56 \text{ об.}$

9. Небольшое тело массой $m = 200 \text{ г}$ брошено под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту со скоростью $V_0 = 10 \text{ м/с}$. Выразить зависимость момента импульса тела \vec{L} от времени в системе координат, изображенной на рисунке, относительно точки O . Определить модуль изменения момента импульса $|\Delta \vec{L}|$ для положения тела в точке наивысшего подъема O' и точке падения на землю A .

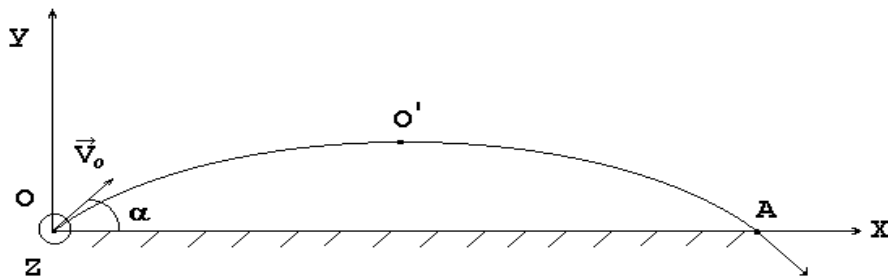
Дано:
 $m = 200 \text{ г}$
 $\alpha = 60^\circ$
 $V_0 = 10 \text{ м/с}$

$\vec{L}(t) - ?$
 $|\Delta \vec{L}| - ?$

Решение:

Введем правостороннюю систему координат $OXYZ$, как показано на рисунке. По определению момент импульса тела \vec{L} относительно точки O $\vec{L} = [\vec{r} \cdot \vec{p}]$, где \vec{r} – радиус-вектор тела; \vec{p} – импульс тела. С использованием единичных ортов $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ выражение момента импульса для тела, брошенного под углом к горизонту, имеет вид

$$\vec{L}(t) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ x & y & z \\ mV_x & mV_y & mV_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ x & y & 0 \\ mV_x & mV_y & 0 \end{vmatrix} = m(xV_y - yV_x)\vec{e}_z. \quad (1)$$



Как известно, движение тела, брошенного под углом к горизонту, это “сумма” двух независимых движений: равномерного прямоли-

нейного вдоль оси OX со скоростью $V_x = V_0 \cos \alpha$ и движения с ускорением $-g$ вдоль оси OY с начальной скоростью $V_{y0} = V_0 \sin \alpha$. Поэтому выражение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \vec{L}(t) &= m \left\{ V_0 \cos \alpha \cdot t(V_0 \sin \alpha - gt) - (V_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2})V_0 \cos \alpha \right\} \cdot \vec{e}_z = -\frac{1}{2}mV_0 \cos \alpha \cdot gt^2 \vec{e}_z = \\ &= -0,5 \cdot 0,2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 9,81 \cdot t^2 \vec{e}_z = -4,9t^2 \vec{e}_z \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

Время достижения телом точки A в два раза больше времени t_{Π} достижения телом точки наивысшего подъема O' . Поэтому разность моментов импульсов в этих точках:

$$\Delta \vec{L} = \vec{L}_A - \vec{L}_{O'} = -4,9 \cdot 4 \cdot t_{\Pi}^2 \cdot \vec{e}_z + 4,9 \cdot t_{\Pi}^2 \cdot \vec{e}_z = -14,7 \cdot t_{\Pi}^2 \cdot \vec{e}_z. \quad (2)$$

Время достижения точки наивысшего подъема O' определяется выражением

$$t_{\Pi} = \frac{V_0 \sin \alpha}{g} = \frac{10 \cdot 0,866}{9,81} = 0,883 \text{ с}. \quad (3)$$

Окончательно для модуля изменения момента импульса из (2) и (3) получим $|\Delta \vec{L}| = 14,7(0,883)^2 = 11,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$.

Ответ: $\vec{L}(t) = -4,9t^2 \vec{e}_z \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$; $|\Delta \vec{L}| = 11,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$.

Законы сохранения. Работа. Энергия

10. Однородный цилиндр массой $m = 10 \text{ кг}$ и радиусом $r = 5 \text{ см}$ свободно скатывается без проскальзывания с наклонной плоскости высотой $h = 1,0 \text{ м}$. Определить угловую скорость движения и момент импульса цилиндра при его переходе с наклонной плоскости на горизонтальную. Начальная скорость цилиндра равна нулю.

Дано:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$r = 5 \text{ см}$$

$$h = 1,0 \text{ м}$$

$$\omega \text{ —?}$$

$$L \text{ —?}$$

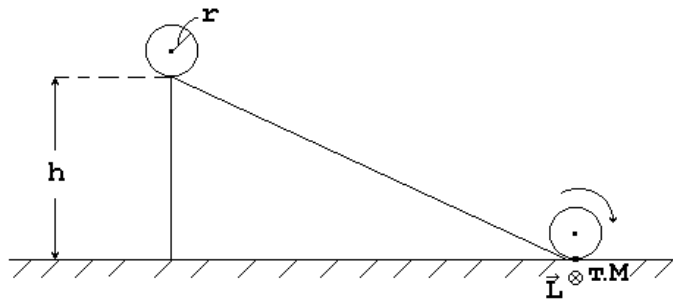
Решение:

В начальный момент движения скорость цилиндра равна нулю и его полная механическая энергия равна потенциальной W_{Π} . При переходе на горизонтальную плоскость полная механическая энергия цилиндра равна сумме кинетической энергии $W_{\text{к}}$ и потенциальной энергии W'_{Π} цилиндра. По закону сохранения полной механической энергии получается

$$W_{\Pi} = W_{\text{к}} + W'_{\Pi}. \quad (1)$$

Потенциальная энергия цилиндра определяется положением центра масс цилиндра над горизонтальной плоскостью. Поэтому $W_{\text{II}} = mg(h + r)$, $W'_{\text{II}} = mgr$, где g – ускорение свободного падения.

Как известно, качение цилиндра по плоской поверхности можно рассматривать как поворот с угловой скоростью ω вокруг мгновенной оси вращения, проходящей по линии соприкосновения цилиндрической поверхности и плоскости. На рисунке мгновенная ось вращения проходит через точку М перпендикулярно плоскости рисунка. Следовательно, кинетическая энергия определяется выражением



$$W_{\text{к}} = \frac{I\omega^2}{2}, \quad (2)$$

где I – момент инерции цилиндра относительно мгновенной оси вращения. Из известного выражения для момента инерции цилиндра относительно оси симметрии и теоремы Штейнера получается

$$I = \frac{mr^2}{2} + mr^2 = \frac{3}{2}mr^2. \quad (3)$$

Выражение (1) с учетом формул (2) и (3) принимает вид

$$mg(h + r) = \frac{3}{4}mr^2\omega^2 + mgr. \quad (4)$$

Из уравнения (4) для угловой скорости ω следует

$$\omega = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{4gh}{3}} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot 1,0}{3}} = 72 \text{ с}^{-1}.$$

Момент импульса \vec{L} при переходе цилиндра на горизонтальную плоскость направлен вдоль мгновенной оси вращения, как показано на рисунке. Модуль момента импульса:

$$L = I\omega = \frac{3}{2}mr^2\omega = \frac{3 \cdot 10 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 72}{2} = 2,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

Ответ: $\omega = 72 \text{ с}^{-1}$; $L = 2,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$.

11. Два шара, один массой $m_1 = 2$ кг, второй $m_2 = 3$ кг, на горизонтальной плоскости движутся навстречу во взаимно перпендикулярных направлениях и сталкиваются абсолютно неупруго. Найти после соударения скорость шаров V_3 , направление скорости и часть механической энергии шаров, перешедшей во внутреннюю энергию шаров. До соударения скорость первого шара $V_1 = 5$ м/с, второго – $V_2 = 3$ м/с.

Дано:

$$m_1 = 2 \text{ кг}$$

$$m_2 = 3 \text{ кг}$$

$$V_1 = 5 \text{ м/с}$$

$$V_2 = 3 \text{ м/с}$$

$$V_3 - ?$$

$$\alpha - ?$$

$$\Delta W - ?$$

Решение:

На горизонтальной плоскости введем систему координат XOY , как показано на рис. 1. Соударение шаров происходит в начале системы координат. Соударение абсолютно неупругое, поэтому шары «слипаются» и движутся вместе со скоростью \vec{V}_3 , как показано на рис. 1. Внешняя сила (сила тяжести), действующая на шары, перпендикулярна к горизонтальной плоскости и, следовательно, выполняется закон сохранения импульса:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \vec{P}_3, \quad (1)$$

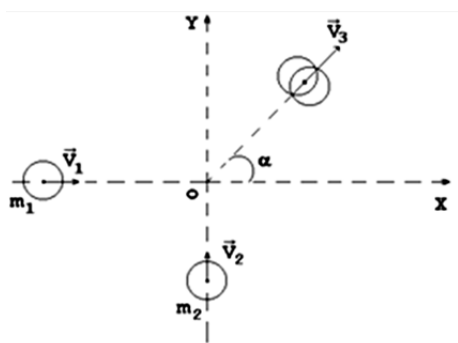


Рис. 1.

где \vec{P}_1 – импульс первого шара до соударения; \vec{P}_2 – импульс второго шара до соударения; \vec{P}_3 – импульс шаров после соударения. Из характера движения шаров и закона сохранения импульса следует, что направления векторов $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ должны соответствовать рис. 2, а модули векторов связаны соотношением $P_3^2 = P_1^2 + P_2^2$, или

$$((m_1 + m_2)V_3)^2 = (m_1V_1)^2 + (m_2V_2)^2. \quad (2)$$

Из уравнения (2) для скорости V_3 получаем

$$V_3 = \frac{1}{m_1 + m_2} \sqrt{(m_1V_1)^2 + (m_2V_2)^2} = \frac{1}{5} \sqrt{100 + 81} = 2,7 \text{ м/с.}$$

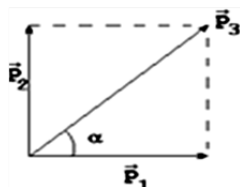


Рис. 2.

Угол α , характеризующий направление скорости \vec{V}_3 , может быть найден из рис. 2 по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{P_2}{P_1} = \arctg 0,9 = 42^\circ.$$

При абсолютно неупругом соударении механическая энергия тел уменьшается на величину ΔW , перешедшую во внутреннюю энергию шаров. Движение происходит на горизонтальной плоскости, поэтому механическая энергия системы обусловлена кинетической энергией шаров. Окончательно

$$\Delta W = \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) V_3^2}{2} = \frac{2 \cdot 25}{2} + \frac{3 \cdot 9}{2} - \frac{5 \cdot 7,3}{2} = 20,25 \text{ Дж.}$$

Ответ: $V_3 = 2,7 \text{ м/с}$; $\alpha = 42^\circ$; $\Delta W = 20,25 \text{ Дж}$.

12. На демонстрационной скамье Жуковского вращается с частотой $n_1 = 1 \text{ об/с}$ человек, держащий за центр горизонтально расположенный металлический стержень массой $m = 5 \text{ кг}$ и длиной $l = 1,5 \text{ м}$. Определить частоту вращения человека n_2 и совершенную работу A , если он повернет стержень в вертикальное положение. Момент инерции человека и скамьи $I_0 = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Дано:

$$n_1 = 1 \text{ об/с}$$

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$l = 1,5 \text{ м}$$

$$I_0 = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$n_2 - ?$$

$$A - ?$$

Решение:

Вращение человека со стержнем происходит вокруг вертикальной оси, момент внешних сил относительно которой равен нулю. Поэтому величина момента импульса L относительно вертикальной оси остается неизменной при повороте стержня, т. е.

$$L_1 = L_2 \text{ или}$$

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2, \quad (1)$$

где I_1 и ω_1 – момент инерции и угловая скорость человека со стержнем, горизонтально расположенным;

I_2 и ω_2 – момент инерции и угловая скорость человека со стержнем, вертикально расположенным. Угловая скорость ω и число оборотов в единицу времени связаны соотношением

$$\omega = 2\pi n. \quad (2)$$

Момент инерции стержня I_c относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей через его центр масс: $I_c = \frac{1}{12} ml^2$. Поэтому

$$I_1 = I_0 + I_c = I_0 + \frac{1}{12} ml^2. \quad (3)$$

При повороте стержня в вертикальное положение его момент инерции становится равным нулю. Следовательно,

$$I_2 = I_0. \quad (4)$$

Подставляя соотношения (2) – (4) в формулу (1), получим $(I_0 + \frac{1}{12}ml^2)2\pi n_1 = I_0 2\pi n_2$. Отсюда для величины n_2 следует:

$$n_2 = (1 + \frac{ml^2}{12I_0})n_1 = (1 + \frac{5 \cdot 2,25}{12 \cdot 5})1 = 1,19 \text{ об/с.}$$

Работа A , совершенная человеком при повороте стержня, равна изменению кинетической энергии. Поэтому

$$A = \frac{I_2 \omega_2^2}{2} - \frac{I_1 \omega_1^2}{2} = \frac{4\pi^2}{2} \{I_0 n_2^2 - (I_0 + \frac{ml^2}{12})n_1^2\} = 2(3,14)^2 \{5(1,19)^2 - (5 + \frac{5 \cdot 2,25}{12}) \cdot 1^2\} = 22,5 \text{ Дж.}$$

Ответ: $n_2 = 1,19$ об/с; $A = 22,5$ Дж.

Релятивистская механика. Механика жидкости и газа

13. Плотность покоящегося в системе отсчета K однородного тела в движущейся K' -системе отсчета возрастает на 10 %. Определить скорость движения тела v и изменение массы тела $\frac{m - m_0}{m_0}$ относительно K' -системы отсчета.

Дано:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1,1$$

$v = ?$

$$\frac{m - m_0}{m_0} = ?$$

Решение:

Плотность ρ_0 однородного тела в K -системе отсчета имеет вид

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad (1)$$

где m_0 – масса покоя тела; V_0 – объем тела в K -системе отсчета. Как известно, в движущейся K' -системе отсчета масса m того же тела определяется выражением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

где ϑ – скорость тела относительно K' -системы отсчета; c – скорость света в вакууме. Явление Лоренцева сокращения для объема V тела в K' -системе отсчета дает выражение

$$V = V_0 \sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}. \quad (3)$$

Из соотношений (1) – (3) и условия задачи для скорости тела в K' -системе отсчета следует уравнение

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\rho_0}{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}. \quad (4)$$

Отсюда для скорости тела получается

$$\vartheta = c \sqrt{\frac{\frac{\rho}{\rho_0} - 1}{\frac{\rho}{\rho_0}}} = 3 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{0,1}{1,1}\right)^{1/2} = 0,9 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Из выражения (2) для изменения массы тела вытекает

$$\frac{m - m_0}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} - 1 = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} - 1 = 0,049 = 4,9\%.$$

Ответ: $\vartheta = 0,9 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; $\frac{m - m_0}{m_0} = 0,049$.

14. Шприц, используемый для промывки и смазки шарнирных соединений автомобиля, заполнен керосином плотностью $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$. Радиус поршня шприца $R = 2 \text{ см}$, ход поршня $l = 25 \text{ см}$, радиус выходного отверстия $r = 2 \text{ мм}$. Определить скорость вытекания керосина ϑ_2 из шприца, время τ , за которое будет выдавлен весь керосин из шприца, если давить на поршень с постоянной силой $F = 5 \text{ Н}$. Вязкостью керосина, трением поршня о стенки пренебречь.

Дано:

$$\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$$

$$R = 2 \text{ см}$$

$$l = 25 \text{ см}$$

$$r = 2 \text{ мм}$$

$$F = 5 \text{ Н}$$

$$\vartheta_2 \text{ —?}$$

$$\tau \text{ —?}$$

Решение:

Движение керосина по шприцу соответствует течению идеальной жидкости по двум соединенным цилиндрическим сосудам. В первом – площади поперечного сечения

$$S_1 = \pi R^2 \quad (1)$$

керосин движется со скоростью ϑ_1 , во втором – площади поперечного сечения

$$S_2 = \pi r^2 \quad (2)$$

керосин вытекает со скоростью ϑ_2 . Давление P_1 в первом сосуде, обусловившее движение жидкости и создаваемое поршнем

$$P_1 = \frac{F}{S_1} \quad (3)$$

Для нахождения искоемых величин используем уравнения неразрывности и уравнение Бернулли в сечениях S_1 и S_2 :

$$\begin{cases} \vartheta_1 S_1 = \vartheta_2 S_2 \\ \frac{\rho \vartheta_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho \vartheta_2^2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Из системы уравнений (4) с учетом формул (1) – (3) для скорости вытекания керосина ϑ_2 получается

$$\vartheta_2 = \left(\frac{2F}{\pi R^2 \rho \left(\frac{R^4}{r^4} - 1 \right)} \right)^{1/2} \cdot \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{2 \cdot 5}{3,14 \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 10^4} \right)^{1/2} \cdot 10^2 = 3,15 \text{ м/с.}$$

Скорость движения керосина в шприце ϑ_1 и скорость движения поршня равны. Поэтому время, за которое будет выдавлен весь керосин из шприца, следует из соотношения $\tau = \frac{l}{\vartheta_1} = \frac{l \cdot R^2}{\vartheta_2 \cdot r^2} = \frac{0,25 \cdot 10^2}{3,15} = 7,9 \text{ с.}$

Ответ: $\vartheta_2 = 3,15 \text{ м/с; } \tau = 7,9 \text{ с.}$

II. Молекулярная физика и термодинамика

Основы молекулярно-кинетической теории

15. Удельные теплоемкости некоторого газа равны $c_p = 912$ Дж/кг·К и $c_v = 649$ Дж/кг·К. Определить молярную массу μ этого газа, число степеней свободы i его молекул.

Дано:

$$c_p = 912 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

$$c_v = 649 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

$$\mu - ?$$

$$i - ?$$

Решение:

Как известно, молярные теплоемкости C_p и C_v при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно связаны соотношением

$$C_p = C_v + R, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная. Отсюда для связи соответствующих удельных теплоемкостей получается

$$C_p = C_v + \frac{R}{\mu}. \quad (2)$$

Из выражения (2) найдем молярную массу газа:

$$\mu = \frac{R}{c_p - c_v} = \frac{8,314}{912 - 649} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Удельная теплоемкость при постоянном объеме связана с числом степеней свободы молекул газа i выражением

$$c_v = \frac{i \cdot R}{2 \cdot \mu}. \quad (3)$$

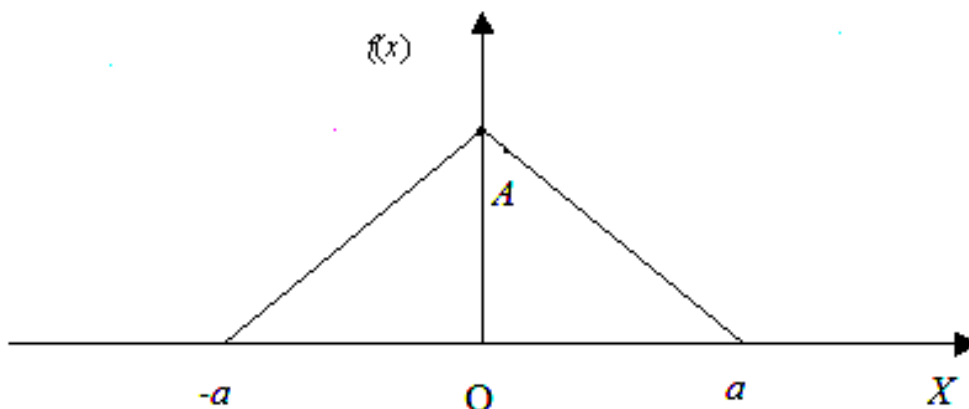
Из формулы (3) получается значение числа степеней свободы

$$\text{молекул газа: } i = \frac{2c_v\mu}{R} = \frac{2 \cdot 649 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{8,314} = 5.$$

Ответ: $\mu = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $i = 5$.

Элементы статистической физики

16. На рисунке приведен график функции распределения некоторой случайной величины x . Считая известной величину a , определить константу A из условия нормировки функции распределения. Вычислить средние значения x и x^2 .



Решение:

Знание функции распределения $f(x)$ позволяет найти среднее любой функции $\Phi(x)$ по формуле

$$\langle \Phi(x) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x) f(x) dx. \quad (1)$$

Для определения вида функции распределения необходимо найти константу A . Это можно сделать из условия нормировки функции распределения:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1. \quad (2)$$

Из геометрической интерпретации этого интеграла следует, что выражение (2) равно площади под кривой графика функции распределения, т. е. $A \cdot a = 1$. Отсюда для константы A получается $A = \frac{1}{a}$. По известной величине A и по графику можно установить аналитический вид функции распределения $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & - \quad -\infty < x < -a \\ \frac{x}{a^2} + \frac{1}{a} & - \quad -a \leq x < 0 \\ -\frac{x}{a^2} + \frac{1}{a} & - \quad 0 \leq x \leq a \\ 0 & - \quad 0 < x < +\infty \end{cases} \quad (3)$$

Из формул (1) и (3) для средних значений $\langle x \rangle$ и $\langle x^2 \rangle$ следует:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx = \int_{-\infty}^{-a} 0 \cdot dx + \int_{-a}^0 x \cdot \left(\frac{x}{a^2} + \frac{1}{a} \right) \cdot dx + \int_0^a x \cdot \left(-\frac{x}{a^2} + \frac{1}{a} \right) \cdot dx + \int_a^{\infty} 0 \cdot dx = 0;$$

$$\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot f(x) \cdot dx = \int_{-\infty}^{-a} 0 \cdot dx + \int_{-a}^0 x^2 \cdot \left(\frac{x}{a^2} + \frac{1}{a} \right) \cdot dx + \int_0^a x^2 \cdot \left(-\frac{x}{a^2} + \frac{1}{a} \right) \cdot dx + \int_a^{\infty} 0 \cdot dx = \frac{a^2}{6}.$$

$$\text{Ответ: } A = \frac{1}{a}; \langle x \rangle = 0; \langle x^2 \rangle = \frac{a^2}{6}.$$

17. На какой высоте h давление воздуха вдвое меньше, чем на уровне моря? Температура воздуха $T = 290$ К.

Дано:

$$\frac{P(h)}{P_0} = 0,5$$

$$T = 290 \text{ К}$$

$$\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$h - ?$$

Решение:

Зависимость давления $P(h)$ атмосферы от высоты выражается барометрической формулой

$$P(h) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right), \quad (1)$$

где P_0 – давление на уровне моря; μ – молярная масса воздуха; g – ускорение свободного падения; R – универсальная газовая постоянная.

Логарифмирование выражения (1) дает

$$\ln \frac{P(h)}{P_0} = -\frac{\mu gh}{RT}. \quad (2)$$

Из соотношения (2) находим высоту h : $h = -\ln \frac{P(h)}{P_0} \cdot \frac{RT}{\mu g}$,

$$h = \frac{0,693 \cdot 8,314 \cdot 290}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} = 5,87 \text{ км.}$$

Ответ: $h = 5,87$ км.

Физическая кинетика

18. Определить среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$, среднее число столкновений в единицу времени $\langle z \rangle$, среднюю продолжительность свободного пробега молекул водорода $\langle \tau \rangle$ в сосуде при температуре $T = 290$ К и плотности $\rho = 1$ г/м³. Эффективный диаметр молекулы водорода $d = 2,3 \cdot 10^{-10}$ м.

Дано:

$$T = 290 \text{ К}$$

$$\rho = 1 \text{ г/м}^3$$

$$\mu = 2 \text{ г/моль}$$

$$d = 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$\langle \lambda \rangle - ?$$

$$\langle z \rangle - ?$$

$$\langle \tau \rangle - ?$$

Решение:

Средняя длина свободного пробега молекул определяется концентрацией n по формуле

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} \quad (1)$$

Среднее число столкновений в единицу времени выражается соотношением, в которое входит средняя скорость молекул $\langle v \rangle$:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle \quad (2)$$

Средняя продолжительность свободного пробега молекул $\langle \tau \rangle$ имеет вид

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle} = \frac{1}{\langle z \rangle} \quad (3)$$

По известной плотности газа ρ концентрация молекул n может быть вычислена из формулы

$$n = \frac{\rho}{\mu} \cdot N_A \quad (4)$$

где N_A – число Авогадро. Средняя скорость молекул газа:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная. Из соотношений (1) и (4)

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\mu}{\sqrt{2}\pi d^2 \rho N_A} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1,41 \cdot 3,14 \cdot (2,3)^2 \cdot 10^{-20} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м.}$$

Из формул (1), (2) и (5) для $\langle z \rangle$ следует

$$\langle z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle \lambda \rangle} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \cdot \frac{1}{\langle \lambda \rangle} = \left(\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 290}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-8}} = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}.$$

По известному значению $\langle z \rangle$ из выражения (3) для $\langle \tau \rangle$ имеем

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{\langle z \rangle} = \frac{1}{1,3 \cdot 10^{11}} = 7,7 \cdot 10^{-12} \text{ с.}$$

Ответ: $\langle \lambda \rangle = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}$; $\langle z \rangle = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$; $\langle \tau \rangle = 7,7 \cdot 10^{-12} \text{ с}$.

Термодинамические процессы, циклы

19. Азот массой $m = 30$ г занимает объем $V_1 = 10$ л и находится под давлением $P_1 = 0,1$ МПа. Сначала этот газ нагревается при неизменном давлении до объема $V_2 = 30$ л, а затем при постоянном объеме до давления $P_2 = 0,2$ МПа. Найти:

- изменения ΔU внутренней энергии газа;
- совершенную системой работу A ;
- количество теплоты Q , переданной газу;
- конечную температуру T_3 .

Построить график процесса на $P-V$ диаграмме.

Дано:

$$m = 30 \text{ г}$$

$$V_1 = 10 \text{ л}$$

$$P_1 = 0,1 \text{ МПа}$$

$$V_2 = 30 \text{ л}$$

$$P_2 = 0,2 \text{ МПа}$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\Delta U - ?$$

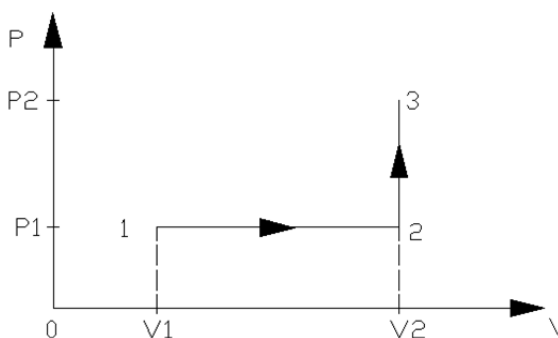
$$A - ?$$

$$Q - ?$$

$$T_3 - ?$$

Решение:

Анализ условия задачи начнем с построения графика процесса на $P-V$ диаграмме, учитывая соотношения величин P_1 , P_2 , V_1 , V_2 .



Как видно из рисунка, система из состояния 1 переходит в конечное состояние 3 сначала по изобаре 1 – 2, а затем по изохоре 2 – 3. Из графика следует, что работа A , совершенная газом в этом процессе, равна площади прямоугольника под изобарой 1 – 2, т.е.

$$A = P_1(V_2 - V_1) = 0,1 \cdot 10^6 (30 - 10) \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Для определения изменения внутренней энергии газа в рассматриваемом процессе $\Delta U = U_3 - U_1$ используем уравнение Клапейрона – Менделеева

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (1)$$

и calorическое уравнение состояния двухатомного идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{5}{2} RT. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) для ΔU следует:

$$\begin{aligned} \Delta U = U_3 - U_1 &= \frac{m}{\mu} \cdot \frac{5}{2} RT_3 - \frac{m}{\mu} \cdot \frac{5}{2} RT_1 = \frac{5}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \\ &= \frac{5(0,2 \cdot 10^6 \cdot 30 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-3})}{2} = 12,5 \cdot 10^3 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Из первого закона термодинамики для количества теплоты Q , переданного газу, получается

$$Q = \Delta U + A = 14,5 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Из уравнения Клапейрона – Менделеева (1) для конечной температуры газа T_3 имеем $T_3 = \frac{P_2 V_2 \mu}{m \cdot R} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-3} \cdot 8,314} = 674 \text{ К.}$

Ответ: $\Delta U = 12,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$; $A = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$; $Q = 14,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$; $T_3 = 674 \text{ К.}$

20. Одноатомный газ, имевший при давлении $P_1 = 100 \text{ кПа}$ объем $V_1 = 5 \text{ м}^3$, сжимался изобарически до объема $V_2 = 1 \text{ м}^3$, затем – адиабатически и на последнем участке цикла расширялся при постоянной температуре до начального объема и давления. Найти теплоту Q_1 , полученную газом от нагревателя, теплоту Q_2 , переданную газом холодильнику, работу A , совершенную газом за весь цикл, КПД цикла η . Изобразить цикл на $P-V$ диаграмме.

Дано:

$$i = 3$$

$$P_1 = 100 \text{ кПа}$$

$$V_1 = 5 \text{ м}^3$$

$$V_2 = 1 \text{ м}^3$$

$$Q_1 - ?$$

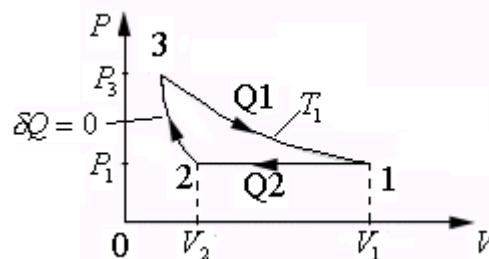
$$Q_2 - ?$$

$$A - ?$$

$$\eta - ?$$

Решение:

Анализ условия задачи начнем с построения графика цикла на $P-V$ диаграмме, учитывая соотношения величин P_1, P_3, V_1, V_2, V_3 (рисунок).



Как видно из рисунка, на первом участке цикла 1 – 2 газ сжимался изобарически, отдавая холодильнику количество теплоты Q_2 и совершая работу A_{12} . По первому закону термодинамики для перехода из состояния 1 в состояние 2 можно записать:

$$Q_2 = U_2 - U_1 + A_{12}, \quad (1)$$

где $U_2 - U_1$ – изменения внутренней энергии газа. Калорическое уравнение состояния одноатомного газа имеет вид

$$U = \nu \cdot \frac{3}{2} \cdot RT, \quad (2)$$

где ν – количество вещества.

Уравнение Клапейрона – Менделеева имеет вид

$$PV = \nu \cdot RT. \quad (3)$$

Используя уравнения (2), (3) и тот факт, что работа газа на участке 1 – 2 равна площади прямоугольника (с обратным знаком) под изобарой 1 – 2, для количества теплоты Q_2 из соотношения (1) получим

$$Q_2 = \frac{3}{2}P_1(V_2 - V_1) + P_1(V_2 - V_1) = \frac{5}{2}P_1(V_2 - V_1) = -\frac{5}{2} \cdot 10^5 \cdot 4 = -1 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Знак “минус” показывает, что количество теплоты Q_2 отдается газом холодильнику.

Количество теплоты Q_1 , которое получает газ от нагревателя на изотерме 3 – 1 при температуре T_1 , по первому закону термодинамики:

$$Q_1 = A_{31}, \quad (4)$$

где A_{31} – работа, совершенная газом на участке 3 – 1.

Как известно, работа газа при изотермическом процессе определяется формулой

$$A_{31} = \nu \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_3}\right). \quad (5)$$

Состояния (3) и (1) находятся на одной изотерме, поэтому

$$P_3V_3 = P_1V_1. \quad (6)$$

В то же время состояния (3) и (2), как видно из рисунка, соответствуют одной адиабате, поэтому из уравнения Пуассона следует:

$$P_3 \cdot V_3^\gamma = P_1 \cdot V_2^\gamma, \quad (7)$$

где γ – показатель адиабаты одноатомного идеального газа. Исключая из уравнений (6) и (7) величины давления P_3 и P_1 , получим

$$\frac{V_1}{V_3} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (8)$$

Используя формулы (3), (5) и (8), для количества теплоты Q_1 из соотношения (4) имеем

$$\begin{aligned} Q_1 = A_{31} &= \nu \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_3}\right) = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \\ &= \frac{5}{2} \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot \ln 5 = 2 \cdot 10^6 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Работа A , совершенная газом за цикл, как вытекает из первого закона термодинамики: $A = Q_1 - |Q_2| = 1 \cdot 10^6$ Дж.

Для КПД цикла η имеем: $\eta = \frac{A}{Q_1} = 0,5 = 50 \%$.

Ответ: $Q_1 = 2 \cdot 10^6$ Дж; $Q_2 = -1 \cdot 10^6$ Дж; $A = 1 \cdot 10^6$ Дж; $\eta = 50 \%$.

Энтропия

21. Найти приращение энтропии ΔS при расширении 0,20 г водорода от объема 1,5 л до объема 4,5 л, если процесс расширения происходит:

- а) при постоянном давлении;
- б) при постоянной температуре.

Дано:
 $m = 0,20$ г
 $\mu = 2$ г/моль
 $\iota = 5$
 $V_1 = 1,5$ л
 $V_2 = 4,5$ л
 а) $\Delta S_p - ?$
 б) $\Delta S_T - ?$

Решение:
 а) Для решения задачи будем опираться на выражение энтропии S идеального газа в переменных V, P и в переменных V, T . Как известно, в переменных V, P энтропия $S(V, P)$ идеального газа определяется формулой

$$S(V, P) = \frac{m}{\mu} \cdot C_P \cdot \ln V + \frac{m}{\mu} \cdot C_V \cdot \ln P + S_0, \quad (1)$$

где $C_P = (\frac{\iota}{2} + 1)R$ – молярная теплоемкость при постоянном давлении идеального газа; $C_V = \frac{\iota}{2} \cdot R$ – молярная теплоемкость при постоянном объеме идеального газа, ι – число степеней свободы молекулы газа; S_0 – постоянная величина.

Из формулы (1) для приращения энтропии ΔS_p при переходе из состояния 1 в состояние 2 при постоянном давлении получим

$$\Delta S_p = S_2 - S_1 = \frac{m}{\mu} C_P \ln V_2 - \frac{m}{\mu} C_P \ln V_1 = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{(\iota + 2)}{2} \cdot R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{0,20}{2} \cdot \frac{7}{2} \cdot 8,314 \cdot \ln 3 = 3,2 \text{ Дж/К.}$$

б) В переменных V, T энтропия $S(V, T)$ идеального газа определяется выражением

$$S(V, T) = \frac{m}{\mu} R \cdot \ln V + \frac{m}{\mu} C_V \cdot \ln T + S'_0, \quad (2)$$

где S'_0 – постоянная величина. Из формулы (2) приращение энтропии ΔS_T – при переходе из состояния 1 в состояние 2 при постоянной температуре:

$$\Delta S_T = S_2 - S_1 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot \ln V_2 - \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot \ln V_1 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{0,2}{2} \cdot 8,314 \cdot \ln 3 = 0,91 \text{ Дж/К.}$$

Ответ: а) $\Delta S_p = 3,2 \text{ Дж/К}$; б) $\Delta S_T = 0,91 \text{ Дж/К}$.

III. Электричество и магнетизм

Электростатика. Диэлектрики

22. Плоское тонкое кольцо с внутренним радиусом R_1 и внешним радиусом R_2 равномерно заряжено с поверхностной плотностью заряда σ .

а) Приняв ось плоского кольца за ось X , найти напряженность электрического поля $\vec{E}(x)$ и электрический потенциал $\varphi(x)$ на оси кольца как функцию x .

б) Найти выражение для $E(x)$ и $\varphi(x)$ при $x=0$ и $|x| \gg R_2$.

Дано:

$$R_1 < R_2$$

σ

а) $\vec{E}(x) - ?$

$\varphi(x) - ?$

б) $E(x) - ?$

$\varphi(x) - ?$

при $x=0$

при $|x| \gg R_2$

Решение:

а) Для решения задачи обратимся к рис. 1, на котором изображено кольцо равномерно заряженное и ось OX . Для определения напряженности \vec{E} и потенциала φ в некоторой точке A на оси OX , координата которой X , разобьем кольцо конечной ширины на бесконечно тонкие кольца ширины dr и радиусы r как показано на рис.1, (вначале рассмотрим случай $\sigma > 0$).

Бесконечно тонкое кольцо радиуса r можно представить как совокупность точечных противоположно лежащих зарядов (элементов кольца) равной величины: $dg_1 = dg_2 = dg$ (как показано на рис. 2). Эти точечные заряды создают напряженность $d\vec{E}_1$ и $d\vec{E}_2$ в точке A , направленные по линиям, соединяющим заряды с точкой A .

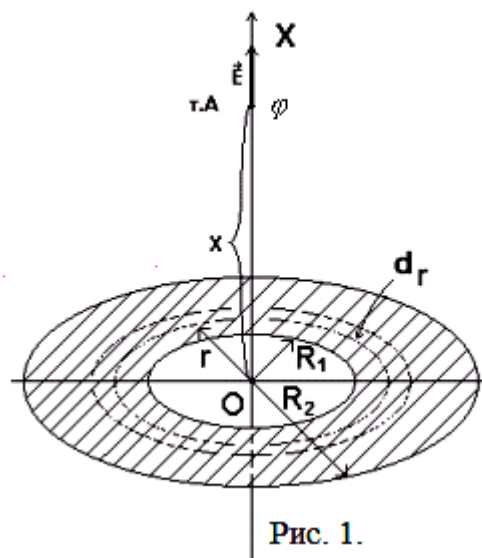


Рис. 1.

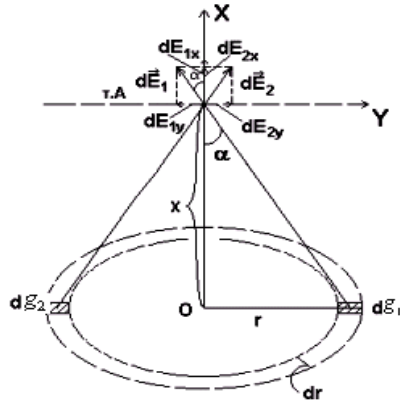


Рис. 2.

Для детального анализа проведем через точку A ось Y перпендикулярно оси OX . Как видно из рис. 2, проекции dE_{1y} , dE_{2y} векторов $d\vec{E}_1$ и $d\vec{E}_2$ равны, но имеют разные знаки. Следовательно, элементы бесконечно тонкого кольца dg_1 и dg_2 создают в точке A вектор напряженности $d\vec{E}_3$, направленный по оси OX . По принципу суперпозиции проекция вектора $d\vec{E}_3$ на ось OX :

$$dE_3 = dE_{1X} + dE_{2X} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dg}{(r^2 + x^2)} \cdot \cos\alpha \cdot 2 = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dg \cdot x}{(r^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где α – угол между векторами $d\vec{E}_1$, $d\vec{E}_2$ и осью OX $\cos\alpha = \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}}$.

Вектор напряженности $d\vec{E}$ от всего бесконечно тонкого кольца будет направлен в точке A вдоль оси OX . По принципу суперпозиций проекция вектора $d\vec{E}$ на ось OX определяется выражением

$$dE = \int_0^{g_0/2} dE_3 = \int_0^{g_0/2} \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \cdot dg = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x \cdot g_0}{(r^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot r \cdot x \cdot dr}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где $g_0 = 2\pi r \cdot dr \cdot \sigma$ – заряд бесконечно тонкого кольца радиуса r .

Кольцо конечной ширины из рис. 1 можно представить как совокупность бесконечно тонких колец, радиусы которых лежат в пределах от R_1 до R_2 . По принципу суперпозиций значение напряженности электростатического поля в точке на оси OX с координатой X получается интегрированием выражения (2):

$$E(x) = \int_{R_1}^{R_2} dE = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\pi\sigma \cdot r \cdot x \cdot dr}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \cdot x \left\{ \frac{1}{(R_1^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{1}{(R_2^2 + x^2)^{1/2}} \right\}. \quad (3)$$

Вектор напряженности направлен вдоль оси OX , если $\sigma > 0$ ($x > 0$), и против оси, если $\sigma < 0$ ($x > 0$).

Последовательность расчетов при определении потенциала в точке A аналогична последовательности выкладок при нахождении напряженности $E(x)$. Как следует из рис. 2, потенциал в точке A $d\phi_3$ от элементов бесконечно тонкого кольца dg_1 и dg_2 по принципу суперпозиций равен сумме:

$$d\varphi_3 = d\varphi_1 + d\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{dg}{(r^2 + x^2)^{1/2}} \cdot 2, \quad (4)$$

где $d\varphi_1$ – потенциал в точке A от элемента dg_1 ; $d\varphi_2$ – потенциал в точке A от элемента dg_2 .

По принципу суперпозиций потенциал $d\varphi$ в точке A от всего бесконечно тонкого кольца определяется выражением

$$d\varphi = \int_0^{g_0/2} d\varphi_3 = \int_0^{g_0/2} \frac{1 \cdot 2 \cdot dg}{4\pi\varepsilon_0 \cdot (r^2 + x^2)^{1/2}} = \frac{\sigma \cdot r \cdot dr}{2\varepsilon_0 (r^2 + x^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

Значение потенциала $\varphi(x)$ в точке с координатой x на оси OX от кольца конечной ширины из рис. 1 получается интегрированием соотношения (5):

$$\varphi(x) = \int_{R_1}^{R_2} d\varphi = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\sigma \cdot r \cdot dr}{2\varepsilon_0 (r^2 + x^2)^{1/2}} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \cdot \left\{ (R_2^2 + x^2)^{1/2} - (R_1^2 + x^2)^{1/2} \right\} \quad (6)$$

б) В точке в центре кольца значения напряженности $E(0)$ и потенциала $\varphi(0)$ получаются простой подстановкой $x=0$ в формулы (3) и (6) соответственно: $E(0) = 0$; $\varphi(0) = \frac{\sigma \cdot (R_2 - R_1)}{2\varepsilon_0}$.

Для точек на оси OX , далеко расположенных от кольца ($|x| \gg R_2$), выражение для $E(x)$ и $\varphi(x)$ могут быть получены в результате разложения формул (3) и (6) по малым параметрам $\frac{R_2}{x}$ и $\frac{R_1}{x}$ (стремящимся к нулю) в ряд. В этих преобразованиях ввиду малости $\frac{R_2}{x}$ и $\frac{R_1}{x}$ можно ограничиться первыми членами ряда. Окончательно имеем

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \cdot x \cdot \left\{ \frac{1}{(R_1^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{1}{(R_2^2 + x^2)^{1/2}} \right\} = \frac{\sigma \cdot x}{2\varepsilon_0 \cdot x} \left\{ \frac{1}{(1 + (\frac{R_1}{x})^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1 + (\frac{R_2}{x})^2)^{1/2}} \right\} = \\ &= \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_1}{x}\right)^2 - 1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_2}{x}\right)^2 \right\} = \frac{\sigma(R_2^2 - R_1^2)}{4\varepsilon_0 \cdot x^2}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \cdot \left\{ (R_2^2 + x^2)^{1/2} - (R_1^2 + x^2)^{1/2} \right\} = \frac{\sigma \cdot x}{2\varepsilon_0} \cdot \left\{ \left(1 + \left(\frac{R_2}{x}\right)^2\right)^{1/2} - \left(1 + \left(\frac{R_1}{x}\right)^2\right)^{1/2} \right\} = \\ &= \frac{\sigma \cdot x}{2\varepsilon_0} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R_2^2}{x^2} - 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{R_1^2}{x^2} \right\} = \frac{\sigma(R_2^2 - R_1^2)}{4\varepsilon_0 \cdot |x|}. \end{aligned} \quad (8)$$

Вид формул (7) и (8) согласуется с представлением, что на

больших расстояниях электростатическое поле заряженного кольца должно совпадать с полем точечного заряда такой же величины.

Ответ: а)
$$E(x) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \cdot x \left\{ \frac{1}{(R_1^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{1}{(R_2^2 + x^2)^{1/2}} \right\};$$

$$\varphi(x) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \cdot \left\{ (R_2^2 + x^2)^{1/2} - (R_1^2 + x^2)^{1/2} \right\};$$

б) $E(0) = 0; \varphi(0) = \frac{\sigma(R_2 - R_1)}{2\epsilon_0}; E(x) = \frac{\sigma \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{4\epsilon_0 \cdot x^2}$ при $|x| \gg R_2;$

$$\varphi(x) = \frac{\sigma(R_2^2 - R_1^2)}{4\epsilon_0 \cdot |x|}$$
 при $|x| \gg R_2.$

23. Заряд шарового слоя с внутренним радиусом R_1 , внешним радиусом R_2 распределен с объемной плотностью ρ по закону: $\rho = \frac{\alpha}{r^2}$.

Найти: а) величину заряда Q шарового слоя; б) зависимость напряженности электростатического поля $\vec{E}(r)$ и потенциал $\varphi(r)$ от расстояния r от центра шарового слоя до рассматриваемой точки пространства.

Дано:

$$R_1 < R_2$$

$$\rho = \frac{\alpha}{r^2}$$

а) $Q - ?$

б) $\vec{E}(r) - ?$

$\varphi(r) - ?$

Решение:

а) Из условия задачи следует, что распределение заряда в пространстве обладает сферической симметрией. Поэтому и электрическое поле сферически симметрично, т.е. напряженность электрического поля $\vec{E}(r)$ и потенциал $\varphi(r)$ зависят только от расстояния до центра симметрии точки O .

Силовые линии направлены по радиальным прямым, эквипотенциальные поверхности – сферы.

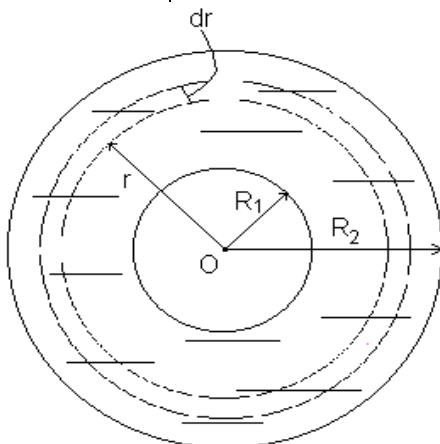


Рис. 1.

Для определения величины заряда Q шарового слоя выделим шаровой слой радиуса r бесконечно малой толщины dr как показано на рис.1.

Объем бесконечно тонкого шарового слоя $dV: dV = 4\pi r^2 \cdot dr$. Ввиду сферической симметрии и бесконечно малой толщины dr плотность заряда $\rho(r) = \frac{\alpha}{r^2}$ в этом шаровом слое можно

считать постоянной. Поэтому заряд бесконечно тонкого шарового слоя dQ :

$$dQ = \rho(r) \cdot dV = \frac{\alpha}{r^2} \cdot 4\pi r^2 \cdot dr = 4\pi\alpha dr. \quad (1)$$

Величину полного заряда Q шарового слоя получим интегрированием выражения (1):

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} dQ = \int_{R_1}^{R_2} 4\pi\alpha \cdot dr = 4\pi \cdot \alpha \cdot (R_2 - R_1). \quad (2)$$

б) Для определения напряженности электрического поля $E(r)$ (вектор \vec{E} направлен по радиальным прямым или против, в зависимости от знака коэффициента α) и потенциала $\varphi(r)$ будем опираться на теорему Гаусса и формулу, связывающую напряженность и потенциал в случае сферической симметрии:

$$E(r) = -\frac{d\varphi(r)}{dr}. \quad (3)$$

Используя форму шарового слоя, разобьем все пространство на три области и проведем гауссовы поверхности (пунктирные линии), как показано на рис. 2.

В области I при $0 \leq r < R_1$ нет зарядов. Поэтому из теоремы Гаусса следует, что напряженность электростатического поля: $E_1 = 0$. Из выражения (3) для потенциала φ_1 в этой области получим

$$\varphi_1 = C_1, \quad (4)$$

где C_1 – постоянная величина.

В области II при $R_1 \leq r < R_2$ на гауссовой поверхности (пунктирная линия) во всех точках напряженность $E(r)$ – величина постоянная, и вектор напряженности $\vec{E}(r)$ направлен перпендикулярно к поверхности. Поэтому поток напряженности $\vec{E}(r)$ через гауссову поверхность: $E(r) \cdot 4\pi r^2$. Заряд внутри гауссовой поверхности $g(r)$ может быть найден по формуле аналогично формуле (2), но с другими пределами интегрирования. Исходя из этих соображений, по теореме Гаусса имеем

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{g(r)}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \int_{R_1}^r dQ = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \int_{R_1}^r 4\pi\alpha \cdot dr = \frac{4\pi\alpha}{\epsilon_0} \cdot (r - R_1). \quad (5)$$

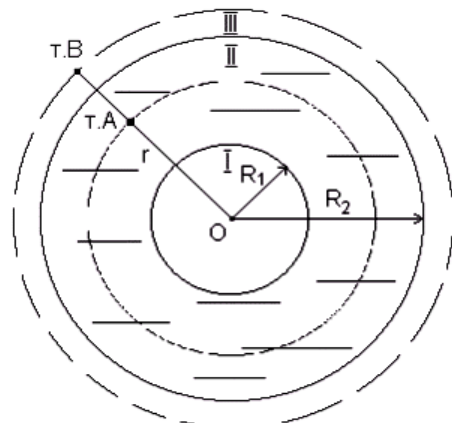


Рис. 2.

Из выражения (5) для напряженности в области II получим

$$E_2 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{R_1}{r^2} \right). \quad (6)$$

Из уравнения (3) и соотношения (6) для потенциала в области II получим

$$\varphi_2 = -\int E_2 \cdot dr = -\int \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{R_1}{r^2} \right) \cdot dr = -\frac{\alpha}{\varepsilon_0} \ln r - \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \cdot \frac{R_1}{r} + C_2, \quad (7)$$

где C_2 – постоянная величина.

В области III при $R_2 \leq r < \infty$ внутри гауссовой поверхности (пунктирная линия) сосредоточен весь заряд Q . Теорема Гаусса в применении к этой поверхности имеет вид

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{4\pi\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0}. \quad (8)$$

Из выражения (8) для напряженности в области III следует:

$$E_3 = \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0 \cdot r^2}. \quad (9)$$

Из уравнения (3) и соотношения (9) для потенциала в области III получим

$$\varphi_3 = -\int E_3 \cdot dr = -\int \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0 \cdot r^2} dr = \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r} + C_3, \quad (10)$$

где C_3 – постоянная величина.

Значение констант C_1, C_2, C_3 можно получить из условий:

- 1) при $r \rightarrow \infty$ $\varphi_3 \rightarrow 0$;
- 2) при $r = R_2$ $\varphi_3(R_2) = \varphi_2(R_2)$;
- 3) при $r = R_1$ $\varphi_2(R_1) = \varphi_1(R_1)$.

Подставляя в условия 1), 2), 3) выражения для потенциалов (4), (7), (10), получим $C_3 = 0$; $C_2 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \cdot (1 + \ln R_2)$; $C_1 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}$.

Таким образом, в области I: $E_1 = 0$, $\varphi_1 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}$; в области II:

$$E_2 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{R_1}{r^2} \right), \quad \varphi_2 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{R_1}{r} - \ln \frac{r}{R_2} \right); \quad \text{в области III: } E_3 = \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0 \cdot r^2},$$

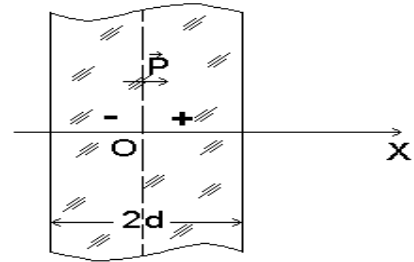
$$\varphi_3 = \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0 \cdot r}.$$

Ответ: а) $Q = 4\pi \cdot \alpha \cdot (R_2 - R_1)$; б) $E_1 = 0$, $\varphi_1 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}$ при $0 \leq r < R_1$;

$$E_2 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{R_1}{r^2} \right), \varphi_2 = \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{R_1}{r} - \ln \frac{r}{R_2} \right) \text{ при } R_1 \leq r < R_2; E_3 = \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0 \cdot r^2},$$

$$\varphi_3 = \frac{\alpha(R_2 - R_1)}{\varepsilon_0 \cdot r} \text{ при } R_2 \leq r < \infty.$$

24. Плоская широкая пластина пьезоэлектрика толщиной $2d$ вследствие неоднородной деформации поляризована так, что модуль вектора поляризации \vec{P} изменяется в направлении, перпендикулярном к плоскости пластины, по закону $P = P_0 \left(1 - \frac{x^2}{d^2} \right)$ (где P_0 – модуль вектора поляризации середины пластины), как показано на рисунке. Вектор поляризации всегда направлен вдоль оси Ox . Найти, пренебрегая краевыми эффектами:



- а) объемную плотность связи зарядов $\rho_{св}$ как функцию x ;
- б) напряженность электрического поля внутри пластины E_1 и вне пластины E_2 ;
- в) разность потенциалов $\Delta\varphi$ между боковыми поверхностями пластин.

Дано:
 $P = P_0 \left(1 - \frac{x^2}{d^2} \right)$
 а) $\rho_{св}(x) - ?$
 б) $E_1(x) - ?$
 $E_2(x) - ?$
 в) $\Delta\varphi - ?$

Решение:

а) У рассматриваемого пьезоэлектрика наблюдается пьезоэлектрический эффект. Он заключается в том, что в определенных твердых веществах, пьезоэлектриках, при деформировании возникает поляризация даже при отсутствии сторонних зарядов.

В случае пренебрежения краевыми эффектами плотность связанных зарядов, напряженность электрического поля зависят только от координаты x . Как известно, связь между вектором поляризации \vec{P} и объемной плотностью связанных зарядов $\rho_{св}$ выражается соотношением

$$\operatorname{div} \vec{P} = -\rho_{св}. \quad (1)$$

В случае зависимости только от одной координаты x для $\rho_{св}(x)$ получается

$$\rho_{св}(x) = -\frac{dP}{dx} = \frac{2P_0}{d^2} \cdot x. \quad (2)$$

б) Как видно из формулы (2), левая часть пластины заряжена отрицательно, а правая – положительно. При пренебрежении краевыми эффектами можно считать, что пластина состоит из бесконечно тонких равномерно заряженных плоскостей, перпендикулярных оси X , причем одинаково заряженные плоскости, но с зарядом разного знака, располагаются симметрично относительно плоскости $X = 0$. Вне пластины такие заряженные плоскости создают напряженности, равные по модулю, но противоположно направленные. Поэтому напряженность электрического поля вне пластин равна нулю, т.е. $E_2 = 0$.

Плотность сторонних зарядов равна нулю, следовательно, по теореме Гаусса в дифференциальной форме для точек внутри пластин можно записать:

$$\operatorname{div} \vec{E}_1 = \frac{\rho_{св}}{\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Из сравнения формул (1) и (3) следует:

$$E_1(x) = -\frac{P(x)}{\varepsilon_0} = -\frac{P_0(1 - \frac{x^2}{d^2})}{\varepsilon_0}. \quad (4)$$

Отрицательное значение $E_1(x)$ показывает, что вектор \vec{E}_1 направлен против оси OX .

в) Опираясь на связь между потенциалом $\varphi(x)$ и напряженностью $E_1(x)$, в данном случае $E_1(x) = -\frac{d\varphi}{dx}$, для разности потенциалов $\Delta\varphi$ между боковыми поверхностями пластин получим

$$\Delta\varphi = -\int_{-d}^d E_1(x) \cdot dx = \int_{-d}^d \frac{P_0}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{x^2}{d^2}\right) \cdot dx = \frac{4}{3\varepsilon_0} \cdot P_0 \cdot d.$$

Ответ: а) $\rho_{св}(x) = \frac{2P_0}{d^2} \cdot x$; б) $E_1(x) = -\frac{P_0}{\varepsilon_0} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{d^2}\right)$; $E_2 = 0$; в) $\Delta\varphi = \frac{4}{3\varepsilon_0} \cdot P_0 \cdot d$.

25. Пластины из стекла с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 7$, толщиной $d = 2$ мм, площадью $S = 300 \text{ см}^2$ поместили в однородное электрическое поле с напряженностью $E_0 = 1$ кВ/м перпендикулярно силовым линиям. Найти:

- а) плотность связанных зарядов $\sigma_{св}$ на поверхности пластины;
- б) энергию электрического поля W в области пластин.

Дано:
 $\varepsilon = 7$
 $d = 2 \text{ мм}$
 $S = 300 \text{ см}^2$
 $E_0 = 1 \text{ кВ/м}$

а) $\sigma_{\text{св}}$ — ?
 б) W — ?

Решение:

а) Как известно, поверхностная плотность связанных зарядов $\sigma_{\text{св}}$ определяется нормальной составляющей вектора поляризации P_n на поверхности диэлектрика простым соотношением

$$\sigma_{\text{св}} = P_n. \quad (1)$$

В силу симметрии задачи и однородности диэлектрика направление силовых линий внешнего электрического поля \vec{E}_0 , электрического поля внутри диэлектрика \vec{E} , направление вектора поляризации \vec{P} совпадают. Поэтому выполняются известные соотношения для модулей векторов E_0 , E и P :

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}, \quad (2)$$

$$P = |P_n| = (\varepsilon - 1) \cdot \varepsilon_0 E. \quad (3)$$

Из формул (1) – (3) для поверхностной плотности заряда на поверхности пластины, из которой силовые линии выходят, получим

$$\sigma_{\text{св}} = \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 = \frac{6}{7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^3 = 7,6 \text{ н Кл/м}^2.$$

б) Объемная плотность ω энергии электрического поля определяется выражением

$$\omega = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2}. \quad (4)$$

Следовательно, в объеме V прямоугольной пластины сосредоточена энергия W :

$$W = \omega \cdot V = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2} \cdot S \cdot d = \frac{0,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{7} \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 38 \text{ пДж}.$$

Ответ: а) $\sigma_{\text{св}} = 7,6 \text{ нКл/м}$; б) $W = 38 \text{ пДж}$.

Постоянный ток

26. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено многослойным диэлектриком, обладающим слабой электропроводностью. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика ε монотонно уменьшается от значения $\varepsilon_1 = 4$ пластины 1 до значения $\varepsilon_2 = 3$ у

пластины 2. Удельная электропроводность σ монотонно уменьшается от значения $\sigma_1 = 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ у пластины 1 до значения $\sigma_2 = 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ у пластины 2. Конденсатор включен в цепь с постоянной ЭДС, и в нем устанавливается постоянный электрический ток силой $J = 1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, текущий через диэлектрик от стороны 1 конденсатора к стороне 2. Найти величину свободного заряда Q , возникшего в диэлектрике при протекании тока.

Дано:

$$\varepsilon_1 = 4$$

$$\varepsilon_2 = 3$$

$$\sigma_1 = 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$$

$$\sigma_2 = 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$$

$$J = 1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$$

$Q - ?$

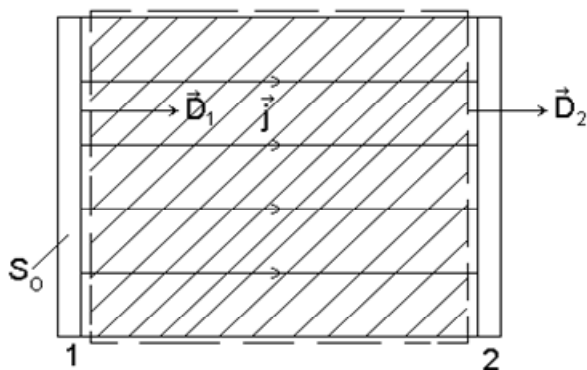
Решение:

Среда между пластинами конденсатора обладает как электропроводящими, так и диэлектрическими свойствами. Поэтому в решении используется закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (1)$$

где \vec{J} – плотность тока; \vec{E} – напряженность электрического поля.

Также используется теорема Гаусса для диэлектрика. Направление линий тока вектора \vec{J} и направления векторов электрического смещения D_1 и D_2 у пластины 1 и пластины 2 соответственно показаны на рисунке.



Ток через среду постоянный, линии тока перпендикулярны пластинам конденсатора, следовательно, для величин силы тока у пластины 1 и пластины 2 можно записать: $J = j_1 \cdot S_0 = j_2 \cdot S_0$ (S_0 – площадь пластины конденсатора). Это же соотношение с учетом закона Ома (1) принимает форму

$$J = \sigma_1 \cdot E_1 \cdot S_0 = \sigma_2 \cdot E_2 \cdot S_0. \quad (2)$$

Для использования теоремы Гаусса проведем гауссову поверхность в виде прямоугольного параллелепипеда (пунктирная линия на рисунке), так чтобы внутри находился диэлектрик. По теореме Гаусса для диэлектрика, учитывая направление векторов \vec{D} , имеем

$$Q = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = D_2 \cdot S_0 - D_1 \cdot S_0. \quad (3)$$

Связь между вектором электрического смещения \vec{D} и напряженностью \vec{E} электрического поля, как известно, имеет вид

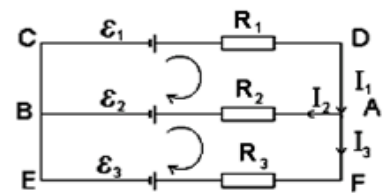
$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (4)$$

Из соотношения (2) – (4) для величины заряда Q следует:

$$\begin{aligned} Q &= D_2 \cdot S_0 - D_1 \cdot S_0 = \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_2 \cdot S_0 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_1 \cdot S_0 = \left(\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot J}{\sigma_2} - \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot J}{\sigma_1} \right) = J \cdot \varepsilon_0 \left(\frac{\varepsilon_2}{\sigma_2} - \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1} \right) = \\ &= 1 \cdot 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{3}{1 \cdot 10^{-10}} - \frac{4}{1 \cdot 10^{-7}} \right) = 27 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.} \end{aligned}$$

Ответ: $Q = 27 \text{ нКл}$.

27. В схеме, изображенной на рисунке, $\varepsilon_1 = 11 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 4 \text{ В}$, $\varepsilon_3 = 6 \text{ В}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$. Внутреннее сопротивление источников тока пренебрежимо мало. Определить силы токов I_1 , I_2 , I_3 , текущих через сопротивления.



Дано:

$$\varepsilon_1 = 11 \text{ В}$$

$$\varepsilon_2 = 4 \text{ В}$$

$$\varepsilon_3 = 6 \text{ В}$$

$$R_1 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 2 \text{ Ом}$$

$$I_1 - ?$$

$$I_2 - ?$$

$$I_3 - ?$$

Решение:

Представленная в задаче схема постоянного тока может быть рассчитана на основе законов Кирхгофа. Для их применения выделим два замкнутых контура $ABCD$ и $AFEB$. Зададим направление обхода этих замкнутых контуров по часовой стрелке, как показано на рисунке. Также будем рассматривать узел схемы A , в котором сходятся (или вытекают) токи I_1 , I_2 , I_3 .

По первому закону Кирхгофа для токов узла A следует уравнение

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

В данном выражении учитывалось правило знаков: ток, втекающий в узел, – положителен, ток, вытекающий из узла, – отрицателен.

По второму закону Кирхгофа для контуров $ABCD$ и $AFEB$ соответственно имеем

$$J_1 \cdot R_1 + J_2 \cdot R_2 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2; \quad (2)$$

$$-J_2 \cdot R_2 + J_3 \cdot R_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_3. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) учитывалось правило знаков, определяемое выбранным направлением обхода контура.

Подставляя известные численные значения сопротивлений участков цепи и ЭДС источников тока в уравнения (1) – (3), получим

$$\begin{cases} 1 \cdot I_1 - 1 \cdot I_2 - 1 \cdot I_3 = 0 \\ 5 \cdot I_1 + 10 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 = 7 \\ 0 \cdot I_1 - 10 \cdot I_2 + 2 \cdot I_3 = -2. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, получается система трех линейных уравнений с тремя искомыми неизвестными I_1 , I_2 , I_3 . Решение такой системы дается формулами Крамера

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (5)$$

где Δ – определитель системы (4); Δ_1 – определитель при первом неизвестном I_1 ; Δ_2 – определитель при втором неизвестном I_2 ; Δ_3 – определитель при третьем неизвестном I_3 .

По значениям коэффициентов системы уравнений (4) следует:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 5 & 10 & 0 \\ 0 & -10 & 2 \end{vmatrix} = 80; \quad (6)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 7 & 10 & 0 \\ -2 & -10 & 2 \end{vmatrix} = 64; \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 5 & 7 & 0 \\ 0 & -2 & 2 \end{vmatrix} = 24; \quad (8)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 5 & 10 & 7 \\ 0 & -10 & -2 \end{vmatrix} = 40. \quad (9)$$

Из выражений (5) – (9) для величин сил токов получается $I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{64}{80} = 0,8 \text{ А}$; $I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{24}{80} = 0,3 \text{ А}$, $I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{40}{80} = 0,5 \text{ А}$.

Ответ: $I_1 = 0,8 \text{ А}$; $I_2 = 0,3 \text{ А}$; $I_3 = 0,5 \text{ А}$.

28. Сила тока в проводнике убывает со временем по закону $I = I_0 e^{-\alpha \cdot t}$ ($I_0 = 20 \text{ А}$, $\alpha = 10^2 \text{ с}^{-1}$). Определить заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время $\tau = 10^{-2} \text{ с}$.

Дано:
 $I = I_0 e^{-\alpha t}$
 $I_0 = 20 \text{ А}$
 $\alpha = 10^2 \text{ с}^{-1}$
 $\tau = 10^{-2} \text{ с}$
 $g - ?$

Решение:
 Величина силы тока I связана с зарядом g , проходящим через поперечное сечение проводника, соотношением

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

Следовательно, за бесконечно малый промежуток времени dt через поперечное сечение проводника пройдет заряд

$$dg = I \cdot dt = I_0 \cdot e^{-\alpha t} \cdot dt. \quad (2)$$

Величина заряда g , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени τ , может быть найдена интегрированием выражения (2):

$$g = \int_0^{\tau} I_0 \cdot e^{-\alpha t} dt = \frac{I_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \tau}) = \frac{20}{100} (1 - \frac{1}{e}) = 0,13 \text{ Кл.}$$

Ответ: $g = 0,13 \text{ Кл.}$

29. В медном проводнике объемом $V_0 = 6 \text{ см}^3$ при прохождении по нему постоянного тока за время $\tau = 1$ мин выделилось количество теплоты $Q = 216 \text{ Дж}$. Найти напряженность E электрического поля в проводнике, плотность тока j , скорость упорядоченного движения электронов u . Считать, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.

Дано:
 $V_0 = 6 \text{ см}^3$
 $\tau = 1 \text{ мин}$
 $Q = 216 \text{ Дж}$
 $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$
 $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
 $\mu = 63,5 \text{ г/моль}$

а) $E - ?$
 б) $j - ?$
 в) $u - ?$

Решение:
 а) Для решения используем закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (1)$$

закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме:

$$Q_{y\partial} = j^2 / \sigma, \quad (2)$$

где σ – удельная электропроводность меди;

$Q_{y\partial} = \frac{Q}{V_0 \cdot \tau}$ – удельная тепловая мощность тока.

Из формул (1) и (2) для напряженности E электрического поля в проводнике следует:

$$E = \left(\frac{Q_{y\partial}}{\sigma} \right)^{1/2} = \left(\frac{Q}{V_0 \cdot \tau \cdot \sigma} \right)^{1/2} = \left(\frac{216}{6 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 5,8 \cdot 10^7} \right)^{1/2} = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ В/м.}$$

б) Из выражения (1) для плотности тока j имеем

$$j = \sigma E = 5,8 \cdot 10^7 \cdot 1,0 \cdot 10^{-1} = 5,8 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}.$$

в) Скорость упорядоченного движения электронов \vec{u} и плотность тока \vec{j} связаны соотношением

$$\vec{j} = \ell_0 \cdot n \cdot \vec{u}, \quad (3)$$

где ℓ_0 – заряд электрона; n – концентрация свободных электронов. Учитывая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон, для концентрации свободных получается

$$n = \frac{\rho}{\mu} \cdot N_A, \quad (4)$$

где N_A – число Авогадро.

Из формул (3) и (4) для скорости упорядоченного движения электронов следует:

$$u = \frac{j}{|\ell_0| \cdot n} = \frac{j \cdot \mu}{|\ell_0| \cdot N_A \cdot \rho} = \frac{5,8 \cdot 10^6 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 8,9 \cdot 10^3} = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Ответ: а) $E = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ В/м}$; б) $j = 5,8 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$; в) $u = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$.

Магнетизм

30. Бесконечно длинный прямой проводник согнут под прямым углом, как показано на рисунке 1. По проводнику течет ток $I = 10 \text{ А}$. Найти магнитную индукцию \vec{B} в точках M и N , если $a = 5 \text{ см}$.

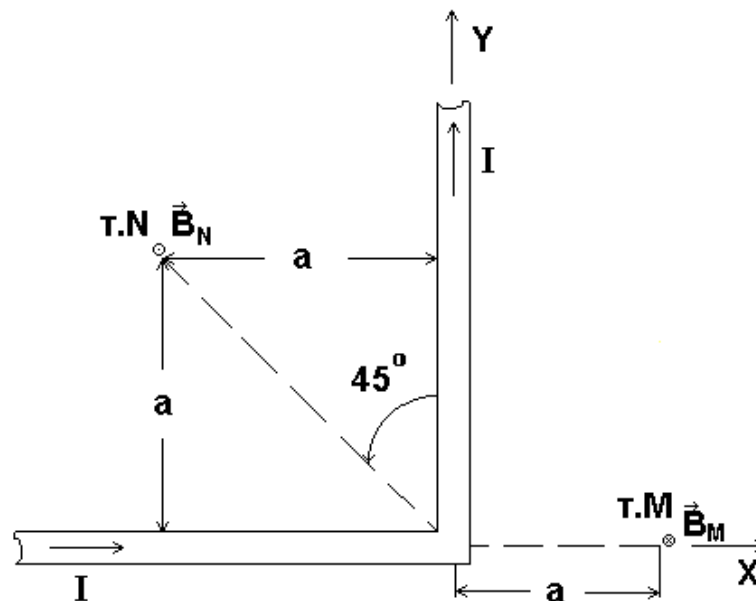


Рис. 1.

Дано:
 $I = 10 \text{ А}$
 $a = 5 \text{ см}$

Решение:
 Величина магнитной индукции \vec{B} в точках M и N может быть найдена по принципу суперпозиции:

$\vec{B}_M - ?$
 $\vec{B}_N - ?$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2, \quad (1)$$

где \vec{B}_1 – магнитная индукция от полубесконечной части проводника, лежащей вдоль оси X ; \vec{B}_2 – магнитная

индукция от полубесконечной части проводника, лежащей вдоль оси Y .

Модуль вектора магнитной индукции может быть рассчитан на основе закона Био-Савара-Лапласа. Нас интересует результат расчета для прямолинейного отрезка проводника, представленного на рисунке 2.

Модуль вектора магнитной индукции в точке A (см. рис. 2) на расстоянии от отрезка проводника выражается формулой

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot b} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; α_1 и α_2 – углы

между направлениями тока и направлениями радиус-векторов r_1 и r_2 – начала и конца отрезка (см. рис. 2).

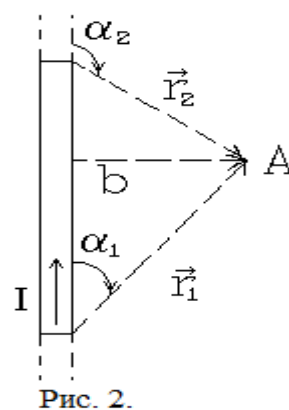


Рис. 2.

В точке M вклад в величину магнитной индукции от полубесконечной части проводника, лежащей вдоль оси X , равен нулю. Вклад в величину магнитной индукции от полубесконечной части проводника, лежащей вдоль оси Y , характеризуется углами $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha_2 = \pi$. Поэтому, как это следует из формул (1) и (2), модуль вектора магнитной индукции B_M в точке M :

$$B_M = B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot a} \cdot (\cos \frac{\pi}{2} - \cos \pi) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{4\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^{-5} = 20 \text{ мкТл.}$$

Направление вектора \vec{B}_M определяется правилом правого винта и показано на рисунке 1.

В точке N , как это следует из правила правого винта, векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 направлены вдоль одной линии перпендикулярно плоскости рисунка. Поэтому модуль вектора магнитной индукции в точке N равен

сумме модулей векторов B_1 и B_2 . Для величины магнитной индукции B_1 , как следует из рис. 1, угол α_1 равен нулю, а угол $\alpha_2 = \frac{3\pi}{4}$. Для величины магнитной индукции B_2 , как следует из рис. 1, угол $\alpha_1 = \frac{\pi}{4}$, а угол $\alpha_2 = \pi$. Поэтому, как это следует из формул (1) и (2), модуль вектора магнитной индукции B_N в точке N :

$$B_N = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot a} (\cos 0^0 - \cos \frac{3\pi}{4}) + \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot a} (\cos \frac{\pi}{4} - \cos \pi) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot a} \cdot (1 + \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} + 1) =$$

$$= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{4\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \cdot (2 + \sqrt{2}) = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 68 \text{ мкТл}.$$

Направление вектора \vec{B}_N определяется правилом правого винта и показано на рис. 1.

Ответ: $B_M = 20 \text{ мкТл}$; $B_N = 68 \text{ мкТл}$.

31. Тонкое кольцо радиусом $r = 10 \text{ см}$ заряжено равномерно с линейной плотностью заряда $\tau = 16 \text{ нКл/м}$. Кольцо вращается с частотой $n = 10 \text{ об/с}$ относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр. Определить магнитный момент \vec{P}_m , обусловленный вращением кольца.

Дано:

$$r = 10 \text{ см}$$

$$\tau = 16 \text{ нКл/м}$$

$$n = 10 \text{ об/с}$$

$$\vec{P}_m - ?$$

Решение:

Вращение заряженного кольца представляет собой круговой ток. Он создает в пространстве магнитный момент, величина модуля которого определяется выражением

$$P_m = I \cdot S, \quad (1)$$

где I – сила кругового тока; S – площадь контура (кольца). Сила кругового тока характеризуется количеством заряда, пересекающего площадку, перпендикулярную линии кольца, в единицу времени. Поэтому для силы тока получается

$$I = g \cdot n, \quad (2)$$

где $g = \tau \cdot 2\pi r$ – заряд кольца.

Из выражений (1) и (2) для величины модуля магнитного момента следует:

$$P_m = I \cdot S = \tau \cdot 2\pi \cdot r \cdot n \cdot \pi \cdot r^2 = \tau \cdot 2\pi \cdot r^3 \cdot n = 16 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 9,87 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 3,16 \frac{\text{нА}}{\text{м}^2}.$$

Направление вектора \vec{P}_m определяется правилом правого винта. Поэтому вектор \vec{P}_m направлен по оси кольца, и его направление совпадает с направлением вектора угловой скорости вращения кольца.

$$\text{Ответ: } P_m = 3,16 \frac{\text{нА}}{\text{м}^2}.$$

32. Длинный прямой соленоид с сердечником намотан из проволоки диаметром $d = 0,5 \text{ мм}$ так, что витки плотно прилегают друг к другу. Найти напряженность магнитного поля и магнитную индукцию внутри соленоида при силе тока $I = 4 \text{ А}$. Магнитную проницаемость μ сердечника соленоида при данной силе тока принять равной 800.

Дано:

$$d = 0,5 \text{ мм}$$

$$I = 4 \text{ А}$$

$$\mu = 800$$

а) H – ?

б) B – ?

Решение:

а) Для длинного прямого соленоида можно пренебречь краевыми эффектами, и модуль напряженности H внутри соленоида определяется формулой

$$H = n \cdot I, \quad (1)$$

где n – число витков соленоида, приходящееся на единицу его длины.

Так как витки плотно прилегают друг к другу, то их число на единицу длины:

$$n = \frac{1}{d}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) для модуля напряженности H имеем

$$H = n \cdot I = \frac{I}{d} = \frac{4}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 8 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Вектор \vec{H} направлен параллельно оси соленоида.

б) Как известно, вектор магнитной индукции \vec{B} связан с вектором напряженности магнитного поля \vec{H} соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}. \quad (3)$$

Из условия задачи и выражения (3) для магнитной индукции внутри соленоида получим $B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 800 \cdot 8 \cdot 10^3 = 8,0 \text{ Тл}$.

Вектор \vec{B} направлен параллельно оси соленоида.

$$\text{Ответ: а) } H = 8 \cdot 10^3 \text{ А/м; б) } B = 8,0 \text{ Тл}.$$

33. Тороид с сердечником, длина которого по средней линии $l = 1\text{ м}$, имеет воздушный зазор шириной $b = 4\text{ мм}$. Обмотка тора равномерно распределена по всей его длине с числом витков на единицу длины $n = 8\text{ см}^{-1}$. Найти силу тока I в обмотке, при которой магнитная индукция в зазоре будет равна $B = 1,0\text{ Тл}$. Магнитную проницаемость μ сердечника тороида при данной силе тока принять равной 800.

Дано:

$$l = 1\text{ м}$$

$$b = 4\text{ мм}$$

$$n = 8\text{ см}^{-1}$$

$$B = 1,0\text{ Тл}$$

$$\mu = 800$$

$$I = ?$$

Решение:

По теореме о циркуляции вектора напряженности магнитного поля \vec{H} можно записать:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^N I_i, \quad (1)$$

где I_i – макроскопические точки, охватываемые контуром L .

Для тороида по средней линии левая часть формулы (1) принимает вид

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = H \cdot l + H_0 \cdot b, \quad (2)$$

где H – напряженность магнитного поля в сердечнике; H_0 – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре. Правая часть выражения (1) в случае тороида с обмоткой принимает форму

$$\sum_{i=1}^N I_i = N \cdot I = n \cdot l \cdot I, \quad (3)$$

где N – число витков всей обмотки тора.

Величины напряженностей магнитного поля H и H_0 , в случае пренебрежения рассеянием магнитного потока, связаны с магнитной индукцией B известными соотношениями:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu}; \quad (4)$$

$$H_0 = \frac{B}{\mu_0}. \quad (5)$$

Приравнявая выражения (2) и (3) с использованием формул (4) и (5), для силы тока I получим

$$I = \frac{H \cdot l + H_0 \cdot b}{n \cdot l} = \frac{B}{\mu_0 \cdot n \cdot l} \left(\frac{l}{\mu} + b \right) = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^2 \cdot 1} \left(\frac{1}{800} + 4 \cdot 10^{-3} \right) = 5,2\text{ А}.$$

Ответ: $I = 5,2\text{ А}$.

IV. Колебания, волны и оптика

Механические колебания и волны

34. Вдоль шнура распространяется поперечная волна, уравнение которой имеет вид $y = 0,05 \sin(1,4\pi \cdot t - 0,5x)$, где y – смещение точек шнура (в метрах); t – время (в секундах); x – координата точек шнура (в метрах).

Найти: а) период колебания точек шнура T ; б) скорость распространения волны V ; в) длину волны λ ; г) разность фаз колебания $\Delta\varphi$ точек шнура, находящихся на расстоянии $\Delta x = 1$ м; д) амплитуду скорости V_m поперечного движения частиц шнура.

Дано:

$$y = 0,05 \sin(1,4\pi \cdot t - 0,5x) \text{ м}$$

$$\Delta x = 1 \text{ м}$$

а) T – ?; б) V – ?; в) λ – ?;

г) $\Delta\varphi$ – ?; д) V_m – ?

Решение:

а) Как известно, уравнение поперечной плоской волны, распространяющейся вдоль оси X , имеет вид

$$y = A \sin(\omega_0 t - kx + \alpha), \quad (1)$$

где A – амплитуда смещения; ω_0 – циклическая частота; k – волновое число; α – начальная фаза.

Из сравнения условий задачи и выражения (1) можно найти искомые величины.

Период колебания T связан с циклической частотой соотношением $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$. Поэтому $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{1,4\pi} = 1,42$ с.

б) Волновое число определяется выражением $k = \frac{\omega_0}{V}$. Поэтому

$$V = \frac{\omega_0}{k} = 8,8 \text{ м/с.}$$

в) По найденным значениям периода колебаний T и скорости волны V можно определить длину волны из соотношения $\lambda = VT = 12,5$ м.

г) Разность фаз колебаний любых двух точек шнура определяется формулой $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta x) = k\Delta x$. Поэтому для точек шнура из условия задачи имеем

$$\Delta\varphi = k \cdot \Delta x = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ рад.}$$

д) Скорость смещения точек шнура в поперечном направлении получается дифференцированием по времени выражения (1), т.е.

$$\frac{dy}{dt} = A \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 t - kx + \alpha). \quad (2)$$

Из условия задачи и формулы (2) для максимального значения скорости $\frac{dy}{dt}$ получается $V_m = A \cdot \omega_0 = 0,05 \cdot 1,4\pi = 0,22 \text{ м/с}$.

Ответ: а) $T = 1,42 \text{ с}$; б) $V = 8,8 \text{ м/с}$; в) $\lambda = 12,5 \text{ м}$; г) $\Delta\varphi = 0,5 \text{ рад}$; д) $V_m = 0,22 \text{ м/с}$.

Электромагнитные колебания и волны

35. В колебательном контуре амплитуда колебаний напряжения на обкладках конденсатора за время $\tau = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ уменьшается в $n = 3$ раза. Найти: а) величину коэффициента затухания B контура; б) величину активного сопротивления R контура; в) добротность Q контура, если емкость конденсатора $C = 0,2 \text{ мкФ}$, индуктивность катушки $L = 8 \text{ Гн}$.

Дано:

$$C = 0,2 \text{ мкФ}$$

$$L = 8 \text{ Гн}$$

$$\tau = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$n = 3$$

$$\text{а) } B - ?$$

$$\text{б) } R - ?$$

$$\text{в) } Q - ?$$

Решение:

а) В колебательном контуре происходят затухающие электрические колебания. Амплитуда колебаний напряжения на обкладках конденсатора U_m со временем t уменьшается по закону

$$U_m(t) = U_0 \cdot e^{-B \cdot t}, \quad (1)$$

где U_0 – постоянная величина.

Через промежуток времени τ амплитуда напряжения равна

$$U_m(t + \tau) = U_0 \cdot e^{-B \cdot (t + \tau)} \quad (2)$$

и уменьшается в n раз. Поэтому из выражений (1) и (2) получается

$$\frac{U_m(t)}{U_m(t + \tau)} = e^{B \cdot \tau} = n. \quad (3)$$

Прологарифмировав выражение (3), для коэффициента затухания имеем $B = \frac{\ln n}{\tau} = \frac{\ln 3}{1 \cdot 10^{-3}} = 1100 \text{ с}^{-1}$.

б) Коэффициент затухания B и активное сопротивление R контура связаны соотношением

$$B = \frac{R}{2L}. \quad (4)$$

Отсюда для величины R следует: $R = 2B \cdot L = 2 \cdot 1100 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 17,6 \text{ Ом}$.

в) Как известно, добротность контура определяется формулой

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{17,6} \sqrt{\frac{8 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-6}}} = 11,4.$$

Ответ: а) $B = 1100 \text{ с}^{-1}$; б) $R = 17,6 \text{ Ом}$; в) $Q = 11,4$.

36. Цепь переменного тока частоты $\nu = 50 \text{ Гц}$ и напряжения $U = 220 \text{ В}$ состоит из последовательно соединенных конденсатора емкости $C = 35,4 \text{ мкФ}$, катушки индуктивности $L = 0,7 \text{ Гн}$, активного сопротивления $R = 100 \text{ Ом}$. Найти: а) импеданс Z ; б) сдвиг по фазе φ между током и напряжением; в) силу тока I ; г) падение напряжения на конденсаторе U_C , катушке U_L , активном сопротивлении U_R .

Дано:

$$U = 220 \text{ В}$$

$$C = 35,4 \text{ мкФ}$$

$$L = 0,7 \text{ Гн}$$

$$R = 100 \text{ Ом}$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$\text{а) } Z - ?$$

$$\text{б) } \varphi - ?$$

$$\text{в) } I - ?$$

$$\text{г) } U_C - ? \quad U_L - ?$$

$$U_R - ?$$

Решение:

Величины, характеризующие протекание тока циклической частоты $\omega = 2\pi\nu$ в цепи, определяются выражениями для индуктивного сопротивления $X_L = \omega \cdot L$, емкостного сопротивления $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$, реактивного сопротивления $X = X_L - X_C$. Поэтому для искомых в задаче величин имеем

$$\begin{aligned} \text{а) } Z &= \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \\ &= \sqrt{10^4 + \left(2\pi \cdot 50 \cdot 0,7 - \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 35,4 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 164 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\text{б) } \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{130}{164} = 0,793, \quad \varphi = 38^\circ 25';$$

$$\text{в) } I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{164} = 1,34 \text{ А};$$

$$\text{г) } U_C = I \cdot X_C = 120 \text{ В}; \quad U_L = I \cdot X_L = 295 \text{ В}; \quad U_R = I \cdot R = 134 \text{ В}.$$

Ответ: а) $Z = 164 \text{ Ом}$; б) $\varphi = 38^\circ 25'$; в) $I = 1,34 \text{ А}$; г) $U_C = 120 \text{ В}$;
 $U_L = 295 \text{ В}$; $U_R = 134 \text{ В}$.

Оптика

37. На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ падает по нормали пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине пленки d_{\min} она в отраженном свете будет казаться зеленой ($\lambda_0 = 550\text{нм}$)?

Дано:

$$n = 1,33$$

$$\lambda_0 = 550 \text{ нм}$$

$$d_{\min} - ?$$

Решение:

Падающий на пленку пучок белого света содержит лучи различных длин волн. При отражении происходит интерференция частей волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки. Как известно, разность хода Δ интерферирующих лучей определяется выражением

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где d – толщина пленки; i – угол падения волны на поверхность пленки; λ – длина волны. Для того чтобы в отраженном свете пленка выглядела зеленой и при этом имела минимальную толщину, разность хода должна равняться λ_0 . Поэтому, как это следует из формулы (1),

$$2d_{\min}\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = \frac{\lambda_0}{2}. \quad (2)$$

Учитывая, что угол падения $i = 90^\circ$, из соотношения (2) имеем

$$d_{\min} = \frac{\lambda_0}{4n} = \frac{550 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 1,33} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: $d_{\min} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$

38. На прозрачную дифракционную решетку с периодом $d = 1,50$ мкм падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 530\text{нм}$. Найти: а) наибольший порядок m главного дифракционного максимума; б) угол дифракции φ_m главного дифракционного максимума наибольшего порядка.

Дано:
 $\lambda = 530 \text{ нм}$
 $d = 1,50 \text{ мкм}$

Решение:
 Условие главного дифракционного максимума порядка m имеет вид

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

$m - ?$
 $\varphi_m - ?$

где φ – угол дифракции соответствующего главного максимума.

Как следует из формулы (1), наибольший порядок дифракционного максимума должен удовлетворять соотношению $\frac{m \cdot \lambda}{d} = \sin \varphi_m \leq 1$.

Отсюда имеем $m = \left[\frac{d}{\lambda} \right] = \left[\frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{530 \cdot 10^{-9}} \right] = [2,83] = 2$. Для соответствующего угла дифракции получим

$$\varphi_m = \arcsin \frac{m \cdot \lambda}{d} = \arcsin \frac{2 \cdot 530 \cdot 10^{-9}}{1,5 \cdot 10^{-6}} = \arcsin 0,7066 = 45^\circ$$

Ответ: $m = 2$; $\varphi_m = 45^\circ$.

39. Луч света, падающий на поверхность кристалла каменной соли, при отражении максимально поляризуется, если угол падения i равен 57° . Найти: а) показатель преломления n кристалла каменной соли; б) скорость распространения V света в этом кристалле.

Дано:
 $i = 57^\circ$
 а) $n - ?$
 б) $V - ?$

Решение:
 а) Согласно закону Брюстера отраженный луч света максимально поляризован, если угол падения луча удовлетворяет соотношению

$$\operatorname{tgi} = n. \quad (1)$$

Поэтому абсолютный показатель преломления кристалла $n = \operatorname{tgi} = \operatorname{tg} 57^\circ = 1,54$.

б) Скорость света в кристалле может быть найдена из известного соотношения

$$V = \frac{c}{n}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме.

Поэтому из формул (1) и (2) имеем

$$V = \frac{c}{n} = \frac{c}{\operatorname{tgi}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,54} = 1,95 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ: а) $n = 1,54$; б) $V = 1,95 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

2.4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ И КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

2.4.1. Методические рекомендации к выполнению расчетно-графических и контрольных работ

Расчетно-графические и контрольные работы выполняются в соответствии с таблицами вариантов РГР № 1, РГР № 2, РГР № 3, РГР № 4 (см. стр. 101 – 105). Из каждой таблицы необходимо выбрать номера задач для своего варианта, затем по номеру найти их тексты (см. стр. 70 – 101). Выбранные задачи нужно решить письменно и в электронной форме выслать преподавателю. Он проверит выполненную расчетно-графическую или контрольную работу и оценку сообщит студенту.

2.4.2. Задачи для расчетно-графических и контрольных работ

I. Механика

Кинематика

1.1. Компоненты скорости частицы изменяются со временем по законам $V_x = a \cos \omega t$, $V_y = a \sin \omega t$, $V_z = 0$, где a и ω – константы. Найти модули скорости $|\vec{V}|$ и ускорения $|\vec{W}|$, а также угол α между векторами \vec{V} и \vec{W} . По какой траектории движется частица?

$$(|\vec{V}| = a; |\vec{W}| = a\omega; \alpha = \pi/2).$$

1.2. Зависимость координат движения частицы от времени имеет вид $x = a \cos \omega t$, $y = a \sin \omega t$, $z = 0$, где a и ω – константы:

а) определить радиус-вектор \vec{r} , скорость \vec{V} и ускорение \vec{W} частицы, а также их модули;

б) найти уравнение траектории частицы.

$$(\vec{r} = a(\cos \omega t \vec{e}_x + \sin \omega t \vec{e}_y); |\vec{r}| = a; \vec{V} = a\omega (-\sin \omega t \vec{e}_x + \cos \omega t \vec{e}_y); |\vec{V}| = a\omega; \vec{W} = -a\omega^2(\cos \omega t \vec{e}_x + \sin \omega t \vec{e}_y); |\vec{W}| = a\omega^2; x^2/a^2 + y^2/a^2 = 1).$$

1.3. Точка движется по окружности радиусом $R = 4$ м. Закон ее движения выражается уравнением $S = A + Bt^2$, где $A = 8$ м, $B = -2$ м/с². Определить момент времени t , когда нормальное ускорение W_n точки

равно 9 м/с^2 . Найти модули скорости V , тангенциального W_τ и полного W ускорений точки в тот же момент времени t .

$$(t = 1,5 \text{ с}; V = 6 \text{ м/с}; W_\tau = 4 \text{ м/с}^2; W = 9,8 \text{ м/с}^2).$$

1.4. Частица движется со скоростью $\vec{V} = at(2\vec{e}_x + 3\vec{e}_y + 4\vec{e}_z)$ ($a = 1 \text{ м/с}^2$).

Найти:

- а) модуль скорости частицы в момент времени $t = 1 \text{ с}$;
- б) ускорение частицы \vec{W} и его модуль;
- в) путь S , пройденный частицей с момента времени $t_1 = 2 \text{ с}$ до $t_2 = 3 \text{ с}$;

г) какой характер имеет движение частицы? Почему?

(а) $V = 5,4 \text{ м/с}$; б) $\vec{W} = a(2\vec{e}_x + 3\vec{e}_y + 4\vec{e}_z)$; $|\vec{W}| = 5,4 \text{ м/с}^2$; в) $S = 13,5 \text{ м}$.

1.5. Точка движется вдоль оси X , причем координата изменяется по закону $x = a \cos[(2\pi/T)t]$. Найти:

- а) выражение для проекции на ось X скорости \vec{V} и ускорения \vec{W} точки;
- б) путь S , пройденный точкой за промежуток времени от $t_1 = T/8$ до $t_2 = T/4$;

(а) $V_x = -(2\pi/T) a \sin(2\pi/T) t$, $W_x = -(2\pi/T)^2 a \cos(2\pi/T) t$; б) $S = 0,707a$.

1.6. Радиус-вектор частицы изменяется со временем по закону $\vec{r} = 3t^2\vec{e}_x + 2t\vec{e}_y + 1\vec{e}_z$. Найти:

- а) скорость \vec{V} и ускорение частицы \vec{W} ;
- б) модуль скорости в момент времени $t = 1 \text{ с}$;
- в) приближенное значение пути S , пройденного частицей за 11-ю секунду движения.

(а) $\vec{V} = 6t\vec{e}_x + 2\vec{e}_y \text{ м/с}$; б) $\vec{W} = 6\vec{e}_x \text{ м/с}^2$; в) $|\vec{V}| = 6,3 \text{ м/с}$, $S = 63 \text{ м}$.

1.7. Тело брошено под углом α к горизонту и в начальный момент времени имеет скорость \vec{V}_0 . Построить качественные зависимости V_x и V_y как функции от времени движения тела до момента падения. Определить радиус кривизны траектории в момент времени $t = \tau/4$, где τ – время движения до падения. Сопротивления движению нет.

$$(R = \frac{V_0^2 \cos^2 \alpha + (V_0 \sin \alpha - g\tau/4)^2}{g \cos(\arctg(\frac{V_0 \sin \alpha - g\tau/4}{V_0 \cos \alpha}))}).$$

1.8. Тело в течение времени τ движется с постоянной скоростью v_0 . Затем скорость его линейно нарастает так, что в момент времени 2τ она равна $2v_0$. Определить путь, пройденный телом за время t . Считать что $\tau < t < 2\tau$.

$$(S = \frac{V_0\tau}{2} + \frac{V_0t^2}{2\tau}).$$

1.9. Точка движется по криволинейной траектории с постоянным тангенциальным ускорением $w_\tau = 0,5 \text{ м/с}^2$. Определить полное ускорение точки в момент времени $t = 5 \text{ с}$ от начала движения, если радиус кривизны траектории в этот момент времени $R = 2 \text{ м}$.

$$(w = 3,2 \text{ м/с}^2).$$

1.10. Начальное значение скорости равно $\vec{v}_1 = 1\vec{e}_x + 3\vec{e}_y + 5\vec{e}_z \text{ (м/с)}$, конечное $\vec{v}_2 = 2\vec{e}_x + 4\vec{e}_y + 6\vec{e}_z \text{ (м/с)}$. Найти:

а) приращение скорости $\Delta\vec{v}$;

б) модуль приращения скорости $|\Delta\vec{v}|$;

в) приращение модуля скорости $\Delta|\vec{v}|$.

$$(\text{ а) } \Delta\vec{v} = 1\vec{e}_x + 1\vec{e}_y + 1\vec{e}_z, \text{ б) } |\Delta\vec{v}| = 1,73 \text{ м/с}, \text{ в) } \Delta|\vec{v}| = 1,57 \text{ м/с}.$$

1.11. По дуге окружности радиусом $R = 10 \text{ м}$ движется точка. В некоторый момент времени от начала движения ускорение точки $w_n = 5,0 \text{ м/с}^2$; вектор полного ускорения \vec{w} образует в этот момент с вектором тангенциального ускорения \vec{w}_τ угол $\alpha = 30^\circ$. Считая $w_\tau = \text{const}$, найти закон изменения $w_n = f(t)$.

$$(w_n = 7,5t^2).$$

1.12. Точка движется по дуге окружности радиусом R . Ее скорость зависит от пройденного пути S по закону $V = k\sqrt{S}$, где k – постоянная. Найти угол между вектором полного ускорения и вектором скорости в зависимости от S .

$$(\alpha = \text{arctg} (\frac{2S}{R})).$$

1.13. Тело брошено под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту с начальной скоростью $V = 30 \text{ м/с}$. Определить радиус кривизны траектории R в максимальной точке подъема тела и в точке его касания с землей. Качественно построить зависимости кинетической W_k , потенциальной W_p и полной W энергии тела как функции времени. Сопротивление движению не учитывать.

$$(R_1 = 45,9 \text{ м}; R_2 = 161 \text{ м}).$$

1.14. Материальная точка движется по окружности радиусом R . Ее тангенциальное ускорение изменяется по закону $w_\tau = kt$, где $k > 0$. В какой момент времени t с начала движения модули нормального и тангенциального ускорения будут равны? Чему равно полное ускорение материальной точки в этот момент времени? Какой угловой путь φ пройдет точка к этому моменту времени? Качественно изобразите закон изменения угловой скорости ω как функцию времени.

$$(t = \sqrt[3]{\frac{4R}{k}}; w = k\sqrt{2}\sqrt[3]{\frac{4R}{k}}; \varphi = 0,67 \text{ рад}).$$

1.15. Точка движется по окружности радиусом $R = 30$ см с постоянным угловым ускорением. Определить тангенциальное ускорение точки, если известно, что с некоторого момента за интервал времени $t = 4$ с она совершила три оборота, и в конце третьего оборота ее нормальное ускорение $w_n = 2,7$ м/с². Определить угловую ω_0 и линейную v_0 скорости в начале указанного интервала времени. Построить графики зависимости модулей ускорения и угловой скорости от времени на интервале движения: $w_n = f(t)$; $\omega = f(t)$.

$$(\omega_0 = 6,44 \text{ рад/с}; v_0 = 1,93 \text{ м/с}).$$

Динамика

1.16. Система состоит из частицы 1 массой 0,1 г, частицы 2 массой 0,2 г и частицы 3 массой 0,3 г. Частица 1 помещается в точке с координатами (1, 2, 3), частица 2 – в точке с координатами (2, 3, 1), частица 3 – в точке с координатами (3, 1, 2) (значения координат даны в метрах). Найти радиус-вектор \vec{r}_c центра масс системы и его модуль.

$$(\vec{r}_c = 2,3\vec{e}_x + 1,8\vec{e}_y + 1,8\vec{e}_z, M_i |\vec{r}_c| = 3,4 \text{ м}).$$

1.17. Тело брошено сначала под углом α_1 к горизонту со скоростью \vec{V}_1 , а затем под углом α_2 со скоростью \vec{V}_2 ($\alpha_1 > \alpha_2$). В начальный момент движения $V_{1x} = V_{2x}$. Сравнить в указанных случаях радиусы кривизны траектории в высшей точке подъема тела. Построить качественно зависимости проекции импульса p_{1y} и p_{2y} как функцию времени движения тела. Сопротивления движению нет.

1.18. Брусок массой $m_1 = 1$ кг покоится на бруске массой $m_2 = 2$ кг. На нижний брусок начала действовать горизонтальная сила $F = 3t$.

В какой момент времени t верхний брусок начнет проскальзывать? Коэффициент трения между брусками $\mu = 0,1$. Трение между нижним бруском и опорой пренебрежимо мало.

$$(t > \frac{\mu g(m_1 + m_2)}{3} = 0,98 \text{ с}).$$

1.19. На горизонтальной доске лежит брусок массой m . Один конец доски поднимается. Изобразите график зависимости силы трения, действующей на брусок, от угла α наклона доски в интервале значений $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$. Коэффициент трения между доской и бруском $\mu_0 = 0,25$.

1.20. На горизонтальной плоскости лежит доска длиной L и массой m_1 . Тело массой m_2 лежит посередине доски. Коэффициент трения между доской и плоскостью – μ_1 , между доской и телом – μ_2 . Какую силу в горизонтальном направлении надо приложить к доске, чтобы тело соскользнуло с нее? За какое время t тело соскользнет, если к доске приложена сила F_0 ?

$$(F > g(\mu_1 + \mu_2)(m_1 + m_2), t = \sqrt{\frac{Lm_1}{F_0 - g(m_1 + m_2)(\mu_1 + \mu_2)}}).$$

1.21. Брусок движется вдоль горизонтальной поверхности под действием постоянной по величине силы, направленной под углом α к горизонту. Коэффициент трения между бруском и поверхностью равен 0,25. При каком значении угла α ускорение бруска вдоль поверхности будет максимальным?

$$(\alpha = 14^\circ).$$

Вращательное движение. Моменты инерции, силы, импульса

1.22. Сфера радиусом $R = 2,0$ м равномерно вращается вокруг вертикальной оси симметрии, делая 30 об/мин. Внутри сферы находится шарик. Найти высоту h , соответствующую положению равновесия шарика. При какой наименьшей угловой скорости радиус вращения шарика будет $0,9R$? Шарик считать материальной точкой.

$$(h = 1,0 \text{ м}).$$

1.23. Найти зависимость ускорения силы тяжести Земли над полюсом от высоты положения тела над уровнем моря h . Построить качественно эту зависимость на графике $g = f(h)$.

1.24. Электровоз массой $m = 184 \cdot 10^3$ кг движется вдоль меридиана со скоростью $v = 20$ м/с (72 км/ч) на широте $\varphi = 45^\circ$. Определить горизонтальную составляющую силы F , с которой электровоз давит на рельсы.

$$(0,38 \text{ кН}).$$

1.25. Тело участвует в двух вращательных движениях, происходящих со скоростями $\vec{\omega}_1 = at^2\vec{e}_x$ и $\vec{\omega}_2 = 2at^2\vec{e}_y$ ($a = 1,0$ рад/с³). Определить:

- а) на какой угол φ повернется тело за первые 3,0 с;
 б) какой угол составляет ось вращения, вокруг которой происходит поворот, с осью X .

$$(\text{ а) } \varphi = 20 \text{ рад; } (\text{ б) } \alpha = 63^\circ).$$

1.26. Тело вращается вокруг неподвижной оси так, что угол его поворота меняется в зависимости от времени t по закону $\varphi = 2\pi(at - \frac{bt^2}{2})$, где $a > 0$, $b > 0$. Найти момент времени τ , в который тело остановится, а также число оборотов N тела до остановки.

$$(\tau = \frac{a}{b}; N = \frac{a^2}{2b}).$$

1.27. Материальная точка движется по окружности радиусом R со скоростью $v = kt$, где $k > 0$. Найти зависимость от времени модуля полного ускорения точки; построить графики зависимости тангенциального и нормального ускорений от времени.

$$(a = \frac{k}{R} \sqrt{k^2 t^4 + R^2}).$$

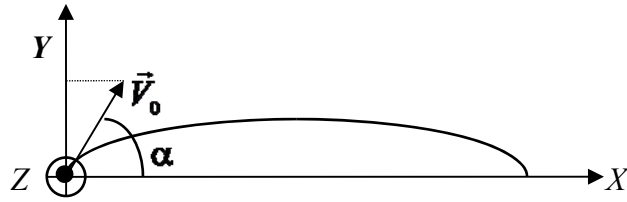
1.28. Определить полное ускорение a в момент времени $t = 3$ с точки, находящейся на ободу колеса радиусом $R = 0,5$ м, вращающегося согласно уравнению $\varphi = At + Bt^3$, где $A = 2$ рад/с, $B = 0,2$ рад/с³. Изобразите графики нормального и полного ускорений $a_n = f(t)$ и $a = f(t)$ на интервале $0 < t < 3$ с.

$$(a = 27,4 \text{ м/с}^2).$$

1.29. Точка движется по окружности с постоянным тангенциальным ускорением. Через некоторый промежуток времени t после начала движения угол между полным ускорением и радиусом окружности равен 45° . Чему равно угловое ускорение точки?

$$(\varepsilon = \frac{1}{t^2}).$$

1.30. Материальная точка (частица) массы m брошена под углом α к горизонту с начальной скоростью \vec{V}_0 (рисунок). Траектория полета частицы лежит в плоскости X, Y . Ось Z направлена "на нас".



Найти зависимость от времени:

- а) момента силы \vec{M} , действующего на частицу;
- б) момента импульса частицы \vec{L} .

$$(\text{ а) } \vec{M} = -mgV_0(\cos \alpha)t\vec{e}_z ; \text{ б) } \vec{L} = -\frac{1}{2}mgV_0(\cos \alpha)t^2\vec{e}_z).$$

1.31. Две материальные точки массами m_1 и m_2 соединены жестким невесомым стержнем длиной L . Найти положение центра масс системы X_c и момент инерции I этой системы относительно перпендикулярной к стержню оси, проходящей через центр масс.

$$(I = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} L^2).$$

1.32. Тело массой $m = 0,1$ кг брошено с некоторой высоты в горизонтальном направлении со скоростью $V_0 = 20$ м/с. Найти модуль приращения момента импульса тела $|\Delta \vec{L}|$ относительно точки бросания за первые $\tau = 5$ с.

$$(|\Delta \vec{L}| = \frac{1}{2}mgV_0\tau^2 = 2,5 \cdot 10^2 \text{ кгм}^2/\text{с}).$$

1.33. Сила с компонентами (3, 4, 5) (Н) приложена к точке с координатами (4, 2, 3) (м). Найти:

- а) момент силы \vec{M} относительно начала координат;
- б) модуль вектора $|\vec{M}|$;
- в) проекцию на ось Z момента силы M_z .

$$(\vec{M} = -2\vec{e}_x - 11\vec{e}_y + 10\vec{e}_z \text{ (Н}\cdot\text{м) } , |\vec{M}| = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}).$$

1.34. Найти момент инерции однородной прямоугольной пластинки массой m , длиной a и шириной b относительно перпендикулярной к ней оси, проходящей через одну из вершин пластинки.

$$(I = \frac{1}{3}m(a^2 + b^2)).$$

1.35. Цилиндр, расположенный горизонтально, может вращаться вокруг оси, совпадающей с осью цилиндра. Масса цилиндра $m_1 = 12$ кг. На цилиндр намотан шнур, к которому привязали гирию массой $m_2 = 1$ кг. С каким ускорением будет опускаться гирия? Какова сила натяжения шнура во время движения гири?

$$(w = 1,4 \text{ м/с}^2; T = 8,4 \text{ Н}).$$

1.36. На обод маховика диаметром $D = 60$ см намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m = 2,0$ кг. Определить момент инерции маховика, если он, вращаясь равноускоренно под действием силы тяжести груза, за время $t = 3,0$ с приобрел угловую скорость $\omega = 9,0$ рад/с.

$$(J = 1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2).$$

1.37. Тонкий обруч радиусом R раскрутили вокруг его оси до угловой скорости ω и положили (опустили) на горизонтальный стол. Через какое время t обруч остановится, если коэффициент трения между столом и обручем равен μ ? Сколько оборотов N сделает обруч до полной остановки?

$$(t = \frac{R\omega}{\mu g}; N = \frac{R\omega^2}{4\pi\mu g}).$$

1.38. С какой угловой скоростью должен вращаться сосуд в виде усеченного конуса, чтобы шарик, лежащий на его дне, выкатился из него? Диаметр верхнего основания равен d . Стенки сосуда наклонены к горизонту под углом α .

$$(\omega = \sqrt{\frac{2g \operatorname{tg} \alpha}{d}}).$$

1.39. Из сплошного однородного цилиндра радиусом R сделали полый, удалив внутреннюю часть радиусом $R/2$ от оси симметрии. Во сколько раз изменится момент инерции тела относительно указанной оси?

$$(\frac{J_1}{J_2} = 1,07).$$

1.40. Из сплошного однородного цилиндра сделали полый, удалив половину его массы. Как изменится момент инерции J цилиндра относительно его оси и во сколько раз? Как и во сколько раз изменит-

ся момент импульса указанных цилиндров, если они вращаются с одинаковой угловой скоростью?

$$\left(\frac{L_1}{L_2} = 1,33\right).$$

1.41. В сплошном однородном диске радиусом R просверлили сквозное отверстие радиусом $R/2$ от оси симметрии. Во сколько раз изменится момент инерции тела относительно указанной оси?

$$\left(\frac{J_2}{J_1} = 0,98\right).$$

1.42. Два однородных цилиндра с одинаковыми высотами h и равными массами m вращаются относительно своих осей симметрии. Соотношение плотностей материалов цилиндров $\rho_1 = (3/4)\rho_2$. Сравнить вращающие моменты сил, если угловые ускорения цилиндров одинаковы, а моменты сил трения $M_{\text{тр}}$ равны.

$$\left(\frac{M_1}{M_2} = 1,33\right).$$

1.43. Грузик массой $5,0$ г, привязанный к нити длиной $l = 50$ см, вращается вокруг вертикальной оси и описывает окружность в горизонтальной плоскости. Какой угол φ образует нить с вертикалью, если частота вращения $n = 1$ с⁻¹. Чему равен модуль проекции момента импульса на ось вращения?

$$\left(\varphi = 60^\circ; L_z = 5,9 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}\right).$$

Законы сохранения. Работа. Энергия

1.44. Платформа в виде диска вращается по инерции около вертикальной оси с частотой $n_1 = 14$ мин⁻¹. На краю платформы стоит человек. Когда человек перешел в центр платформы, частота возросла до $n_2 = 25$ мин⁻¹. Масса человека $m = 70$ кг. Определить массу платформы. Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

$$(m_n = 178 \text{ кг}).$$

1.45. Человек массой $m_0 = 60$ кг находится на неподвижной платформе массой $m = 100$ кг. С какой частотой n будет вращаться платформа, если человек будет двигаться по окружности радиусом $r = 5$ м вокруг оси вращения? Скорость движения человека относи-

тельно платформы $V_0 = 4$ км/ч. Радиус платформы $R = 10$ м. Считать платформу однородным диском, а человека – точечной массой.

$$(n = 0,49 \text{ об/мин}).$$

1.46. Шар скатывается с наклонной плоскости высотой $h = 90$ см. Какую линейную скорость будет иметь шар в тот момент, когда он скатится с наклонной плоскости? Момент инерции шара $J = 0,4 mR^2$.

$$(v = 3,55 \text{ м/с}).$$

1.47. Два шара движутся навстречу друг другу вдоль оси X . Масса первого шара $m_1 = 0,20$ кг, масса второго шара $m_2 = 0,30$ кг. До столкновения проекции скоростей шаров на ось равны $V_{1x} = 1$ м/с, $V_{2x} = -1$ м/с. Найти проекции скоростей шаров V'_{1x} и V'_{2x} после центрального абсолютного упругого соударения.

$$(V'_{1x} = -1,4 \text{ м/с}; V'_{2x} = 0,60 \text{ м/с}).$$

1.48. Тонкий однородный стержень длиной L может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через конец стержня перпендикулярно ему. Стержень отклонили на 90° от положения равновесия и отпустили. Определить скорость V нижнего конца стержня в момент прохождения равновесия.

$$(V = \sqrt{3gL}).$$

1.49. Тонкий однородный стержень длиной l и массой m может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через один из его концов. Стержень устанавливают горизонтально и отпускают. Пренебрегая трением, определить угловую скорость стержня в момент прохождения им положения равновесия. Построить график зависимости углового ускорения стержня от угла между стержнем и горизонтом.

$$(\omega = \sqrt{\frac{3g}{L}}).$$

1.50. Сплошной однородный шар скатывается по наклонной плоскости длиной 5 м. Угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 30^\circ$. Определить скорость шара в конце наклонной плоскости, время движения шара до горизонтальной поверхности и качественно найти зависимость кинетической энергии шара от времени. Потерями энергии пренебречь. Момент инерции шара относительно оси, проходящей через центр масс, $J_0 = \frac{2}{5} mR^2$.

$$(V = 5,9 \text{ м/с}; t = 1,7 \text{ с}).$$

1.51. Сплошной цилиндр катится по горизонтальной поверхности в течение времени $t = 3$ с и останавливается, пройдя расстояние 9 м. Определить коэффициент трения μ , считая его постоянным. Построить качественно зависимость кинетической энергии тела как функцию времени движения.

$$(\mu = 0,31).$$

1.52. Вал массой $m = 50$ кг и радиусом $R = 5$ см вращался с частотой $n = 10$ об/с. К его цилиндрической поверхности прижали тормозную колодку с силой $F = 30$ Н, и через 8 с после начала торможения вал остановился. Определить коэффициент трения μ , считая его постоянным. Построить график зависимости угловой скорости и углового ускорения вала как функцию времени на интервале торможения.

$$(\mu = 0,33).$$

1.53. Шар и сплошной диск имеют одинаковые массы и катятся без проскальзывания по горизонтальной поверхности с одинаковыми постоянными скоростями. Кинетическая энергия шара $W_1 = 70$ Дж. Определить кинетическую энергию диска W_2 . Найти отношение проекций момента импульса тел L_{z1}/L_{z2} на мгновенную ось вращения, если $R_1/R_2 = 0,7$.

$$(W_2 = 75 \text{ Дж}; \frac{L_{z1}}{L_{z2}} = 0,56).$$

1.54. Тело массой M подвешено на нити длиной l . В тело попадает пуля массой m и застревает в нем, нить после этого отклоняется на угол α . Найти скорость пули V . Считать, что вся масса тела M сосредоточена на расстоянии l от точки подвеса.

$$(V = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gl(1-\cos \alpha)}).$$

1.55. Сколько времени будет скатываться цилиндр с наклонной плоскости длиной $l = 2$ м и высотой $h = 0,1$ м, если считать что проскальзывания нет? Качественно постройте зависимость кинетической W_k и потенциальной W_n энергии цилиндра как функцию времени.

$$(t = 3,5 \text{ с}).$$

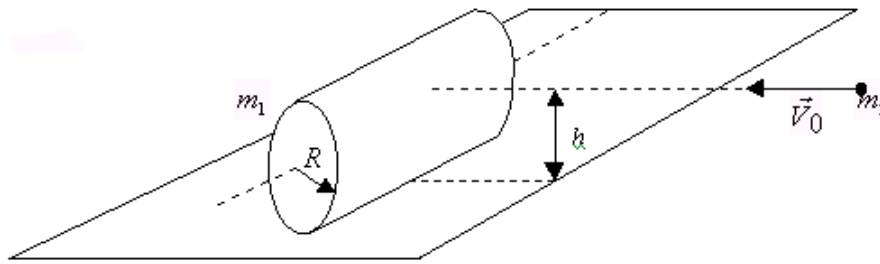
1.56. Два шара массами $m_1 = 10$ кг и $m_2 = 15$ кг подвешены на нитях длиной $l = 2$ м так, что шары соприкасаются между собой. Меньший шар был отклонен на угол $\varphi = 60^\circ$ и отпущен. Определить высо-

ту, на которую поднимутся оба шара после соударения. Соударение шаров считать неупругим.

$$(h = 0,16 \text{ м}).$$

1.57. В цилиндр массой $m_1 = 3$ кг и радиусом $R = 10$ см, покоящийся на плоскости, попадает пуля массой $m_2 = 9$ г, летящая со скоростью $v_0 = 60$ м/с. Пуля летит параллельно плоскости на высоте $h = 0,12$ м от нее и перпендикулярно образующей цилиндра, как видно из рисунка. Считая удар абсолютно неупругим, найдите линейную скорость оси цилиндра, угловую скорость цилиндра. Проскальзыванием цилиндра пренебречь.

$$\left(\omega = \frac{m_2 v_0 h}{1,5 m_1 R^2} = 1,44 \text{ рад/с}; V = 0,14 \text{ м/с}\right).$$



1.58. Тела с массами m_1 и m_2 связаны невесомой и нерастяжимой нитью, которая переброшена через блок массой m , установленный на краю стола. Тело m_1 находится на поверхности стола в закрепленном состоянии. Тело m_2 свободно висит. В момент времени $t = 0$ тело m_1 освободили, и вся система пришла в движение. Считая коэффициент трения между столом и телом m_1 равным μ , пренебрегая скольжением нити по блоку и трением в оси блока, найти работу сил трения за первые t_1 секунд после начала движения. Блок считать однородным диском.

$$\left(A = -\frac{m_1 \mu (m_2 - m_1 \mu)}{2(m_1 + m_2 + \frac{m}{2})} g^2 t_1^2\right).$$

1.59. Стальной шарик массой $m = 8$ г, летящий горизонтально со скоростью 600 м/с, попадает в брусок массой $M = 4m$, прикрепленный к стенке пружиной с жесткостью $k = 24$ кН/м. Считая, что траектория шарика перпендикулярна поверхности бруска и совпадает с осью

пружины, определить величину максимального сжатия пружины, если соударение было: а) абсолютно неупругим; б) абсолютно упругим. Записать закон изменения деформации пружины как функцию от времени для случаев а) и б).

$$(\text{ а) } x_m = 15 \text{ см; б) } x_m = 28 \text{ см}).$$

1.60. Поршень, закрепленный на пружине жесткостью $k = 10$ кН/м, после застревания в нем горизонтально летевшей со скоростью $V = 520$ м/с пули массой 20 г сместился на $x = 8$ см. Определить массу поршня M , если сила трения его о стенки цилиндра составляет 900 Н.

$$(M = 0,5 \text{ кг}).$$

1.61. Нить с подвешенным на ней грузом отклонили на угол α и отпустили. На какой угол β отклонится нить с грузом, если при своем движении будет задержана штифтом, поставленным по вертикали посередине нити? Построить качественную зависимость скорости груза от времени, полагая, что потери энергии в системе не происходит.

$$(\beta = \arccos(2 \cos \alpha - 1)).$$

1.62. Хоккейная шайба, имея начальную скорость $V = 5$ м/с, проходит до удара о борт площадки путь $S = 10$ м. Коэффициент трения шайбы о лед 0,1. Считая удар о борт абсолютно упругим и пренебрегая сопротивлением воздуха, определить, какой путь пройдет шайба после удара. Построить график зависимости $V_x = f(x)$, полагая положительное направление оси Ox к борту.

$$(S_1 = 2,7 \text{ м}).$$

1.63. Человек стоит на неподвижной тележке и бросает горизонтально камень массой $m_1 = 2$ кг со скоростью $V = 8$ м/с. Определить, какую работу A совершает при броске человек, если масса тележки с человеком $m_2 = 140$ кг. Построить график зависимости работы $A = f(m_2)$, если m_2 – величина переменная.

$$(A = 63,1 \text{ Дж}).$$

1.64. Гимнаст "крутит солнце" на перекладине. Считая, что вся масса гимнаста m сосредоточена в его центре масс, и скорость гимнаста в верхней точке равна нулю, определить силу, действующую на руки гимнаста в нижней точке. Построить график зависимости вер-

тикальной составляющей скорости гимнаста от времени $V_y = f(t)$. За начало отсчета принять верхнее положение гимнаста. Трением пренебречь.

$$(F = 5mg).$$

Релятивистская механика. Механика жидкости и газа

1.65. За промежуток времени $\Delta t = 1,0$ с, отсчитанный по часам некоторой системы отсчета K , частица, двигаясь прямолинейно и равномерно, переместилась из начала координат системы K в точку с координатами $X = Y = Z = 1,5 \cdot 10^8$ м. Найти промежуток собственного времени Δt_0 , за который произошло это перемещение.

$$(\Delta t_0 = 0,5 \text{ с}).$$

1.66. Относительно K -системы отсчета вдоль оси OX летит куб со скоростью V_x . Ось OX параллельна одному из ребер куба. Во сколько раз изменится объем куба в K -системе по сравнению с его объемом V_0 относительно неподвижной к кубу системы отсчета? Голится ли полученный ответ для тела произвольной формы?

$$\left(\frac{V}{V_0} = \sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}\right).$$

1.67. Как изменится плотность стального кубика с точки зрения наблюдателя, движущегося вдоль одного из ребер кубика со скоростью $\vec{v} = (C/2)\vec{e}_x$ по сравнению с плотностью относительно наблюдателя, покоящегося по отношению к кубику?

1.68. Электрон движется со скоростью, равной 0,6 скорости света. Определить импульс и полную энергию электрона.

$$(p = 20,5 \cdot 10^{-23} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}; W = 10^{-13} \text{ Дж}).$$

1.69. Две частицы, покоящиеся в K' -системе отсчета на расстоянии Δl друг от друга по оси X' , одновременно распадаются. Одновременным ли будет распад частиц для наблюдателя в K -системе отсчета, относительно которой частицы двигались со скоростью $\vec{v} = v \cdot \vec{e}_x$?

1.70. Определить периметр Π квадрата со стороной a , движущегося со скоростью $\vec{v} = (C/2)\vec{e}_x$ вдоль одной из своих сторон, где C – скорость света.

1.71. В широкой части горизонтально расположенной трубы течет нефть со скоростью $v_1 = 2$ м/с. Определить скорость течения нефти в узкой части трубы, если разность давлений в широкой и узкой частях трубы $\Delta p = 50$ мм рт.ст. Плотность нефти $\rho = 0,85 \cdot 10^3$ кг/м³.
($v_2 = 4,4$ м/с).

II. Молекулярная физика и термодинамика

Основы молекулярно-кинетической теории

2.1. Имеется поток молекул массой m , летящих с одинаковой по модулю и направлению скоростью v . Плотность молекул в потоке – n . Найти:

а) число ν ударов молекул за секунду о единицу поверхности плоской стенки, нормаль к которой образует угол α с направлением \vec{v} ;

б) давление p потока молекул на стенку. Считать, что молекулы отражаются стенкой зеркально и без потери энергии.

$$(\text{ а) } \nu = n v \cos(\alpha); \text{ б) } p = 2 n m v^2 \cos^2(\alpha)).$$

2.2. Определить кинетическую энергию $W_{кр}$ поступательного движения всех молекул газа, находящегося в сосуде объемом $V = 5$ л под давлением $p = 500$ кПа. Определить молярные теплоемкости C_p и C_v этого газа, если считать, что полная кинетическая энергия молекул этого газа в 1,666 раз превышает $W_{кр}$.

$$(W_{кр} = 3,75 \text{ кДж}; C_p = 29 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}; C_v = 21 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}).$$

2.3. Каково давление смеси газов в колбе объемом 2,5 л, если в ней находится 10^{15} молекул кислорода, $4 \cdot 10^{15}$ молекул азота и $3,3 \cdot 10^7$ г аргона? Температура смеси $t = 150$ °С. Найти молярную массу смеси газа.

$$(P = 23,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па}; \mu = 34,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}).$$

2.4. В рассматриваемом интервале температур теплоемкость некоторого тела определяется функцией $C = 10 + 2 \cdot 10^{-2} T + 3 \cdot 10^{-5} T^2$ (Дж/К). Определить количество теплоты Q , получаемое телом при нагревании от $T_1 = 300$ К до $T_2 = 400$ К.

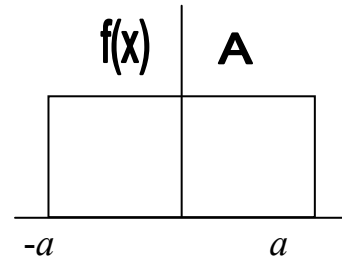
2.5. Некоторый газ при нормальных условиях имеет плотность $\rho = 0,089$ кг/м³. Определить его удельные теплоемкости c_p и c_v ; изме-

нение внутренней энергии ΔU этого газа при изобарическом увеличении его плотности в два раза.

$$(c_p = 14,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}; c_v = 10,4 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}).$$

Элементы статистической физики, распределения

2.6. На рисунке приведен график функции распределения вероятности значения некоторой величины x . Найти константу A , при которой функция оказывается нормированной. Вычислить среднее значение x и x^2 .



$$(A = 1/2a, \langle x \rangle = 0, \langle x^2 \rangle = a^2/3).$$

2.7. Азот находится в равновесном состоянии при $T = 421$ К. Определить относительное число $\Delta N/N$ молекул, скорости которых заключены в пределах от 499,9 до 500,1 м/с.

$$(\Delta N/N = 3,32 \cdot 10^{-4}).$$

2.8. Имеется N частиц, энергия которых может принимать лишь два значения: E_1 и E_2 . Частицы находятся в равновесном состоянии при температуре T . Чему равна суммарная энергия E всех частиц в этом состоянии?

$$(E = N \frac{E_1 \exp(-\frac{E_1}{kT}) + E_2 \exp(-\frac{E_2}{kT})}{\exp(-\frac{E_1}{kT}) + \exp(-\frac{E_2}{kT})}).$$

2.9. Пылинки, взвешенные в воздухе, имеют массу $m = 10^{-8}$ г. Во сколько раз уменьшится их концентрация n при увеличении высоты на $\Delta h = 10$ м? Температура воздуха $T = 300$ К.

$$(В e^{23,6} \text{ раз}).$$

2.10. В кабине вертолета барометр показывает давление $p = 9 \cdot 10^4$ Па. На какой высоте находится вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал $p_0 = 10^5$ Па? Считать, что температура воздуха $T = 290$ К не изменяется с высотой.

$$(h = 890 \text{ м}).$$

2.11. На какой высоте давление воздуха составляет 60 % от давления на уровне моря? Температуру воздуха считать постоянной и равной 0 °С.

$$(h = 4,07 \cdot 10^3 \text{ м}).$$

Физическая кинетика

2.12. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекулы азота в сосуде объемом $V = 5$ л. Масса газа $m = 0,5$ г. Во сколько раз необходимо изобарически изменить температуру газа, чтобы длина свободного пробега молекулы уменьшилась в 2 раза?

$$(\langle \lambda \rangle = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}; T_2/T_1 = 0,5).$$

2.13. Какой наибольшей скорости может достичь дождевая капля шарообразной формы диаметром $d = 0,3$ мм, если она падает в атмосфере при нормальных условиях? Считать, что на интервале установившегося движения капли давление не изменяется с высотой. Эффективный диаметр молекулы воздуха принять равным $3,0 \cdot 10^{-10}$ м.

$$(v = 2,72 \text{ м/с}).$$

2.14. Сколько молекул азота N находится в сосуде объемом 1 л, если температура его 27 °С, а давление – 10 Па? Определить число столкновений z молекулы азота за 1 с. Эффективный диаметр молекулы $d = 3,0 \cdot 10^{-10}$ м.

$$(N = 2,4 \cdot 10^{18}; z = 4,6 \cdot 10^5).$$

2.15. На высоте $h = 20$ см над горизонтальной трансмиссионной лентой, движущейся со скоростью $V = 70$ м/с, параллельно ей подвешена пластина площадью $S = 4$ см². Какую силу надо приложить к этой пластине, чтобы она оставалась неподвижной? В условиях опыта температура воздуха $t = 27^\circ\text{C}$, давление атмосферное. Принять эффективный диаметр молекулы $d = 3 \cdot 10^{-10}$ м.

$$(F = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Н}).$$

2.16. Определить отношение числа столкновений молекул газа за единицу времени для двух состояний, если переход из одного состояния в другое был изобарическим, а отношение объемов в этих состояниях соответствует $V_2/V_1 = 2$.

$$(z_2/z_1 = 0,71).$$

2.17. Качественно изобразить зависимость длины свободного пробега λ и числа z столкновений молекул идеального газа в секунду от давления, если газ сжимается изотермически.

2.18. Двухатомный газ адиабатически расширяется до объема в 2 раза больше начального. Определить, во сколько раз изменится коэффициент диффузии D газа. Эффективный диаметр молекулы считать постоянным.

$$(D_2/D_1 = 1,7).$$

2.19. Найти верхний предел давления водорода в шарообразном сосуде объемом $V = 1$ л, при котором длина свободного пробега молекулы больше размеров сосуда. Расчет произвести при температуре $T = 300$ К. Эффективный диаметр молекулы водорода $d_B = 2,3 \cdot 10^{-10}$ м.
(0,14 Па).

Термодинамические процессы, циклы

2.20. Молекулярный кислород массой $m = 250$ г, имевший температуру $T_1 = 200$ К, был адиабатно сжат. При этом была совершена работа $A = -25$ кДж. Определить конечную температуру T_2 газа.
($T_2 = 354$ К).

2.21. Газ адиабатически расширяется, изменяя объем в 2 раза, а давление в 2,64 раза. Определить молярные теплоемкости C_p и C_v этого газа.

$$(C_p = 29,1 \text{ Дж/мольК}; C_v = 20,8 \text{ Дж/мольК}).$$

2.22. Некоторое количество азота ν , имеющего параметры состояния p_1, V_1, T_1 , переходит при постоянной температуре в состояние 2, а затем при постоянном объеме – в состояние 3. Определить работу перехода 1 – 3, изменение внутренней энергии газа и теплоту, полученную при переходах, если в конце процесса установилась температура T_3 и давление $p_3 = p_1$. Изобразить процесс 1 – 3 на диаграмме $V - T$.

$$(A_{13} = \nu R T_1 \ln(T_3/T_1); \Delta U_{13} = (5/2) \nu R (T_3 - T_1); \\ Q = \nu R [(5/2)(T_3 - T_1) + T_1 \ln(T_3/T_1)]).$$

2.23. Азот плотностью $\rho_1 = 1,4$ кг/м³ занимает объем $V_1 = 5$ л при температуре $t_1 = 27$ °С. Газ адиабатически переведен в состояние с плотностью $\rho = 3,5$ кг/м³. Определить температуру газа T_2 в конце пе-

перехода и изменение его внутренней энергии. Построить переход на диаграмме $S - T$.

$$(T_2 = 433 \text{ К}; \Delta U = 197 \text{ Дж}).$$

2.24. Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется по закону $p^{1/2} \cdot V = \text{const}$? Изобразить этот закон на диаграмме $(V - T)$. Считая этот процесс политропическим, определить, чему равен показатель политропы η . При расширении газа тепло подводится к нему или отводится от него? Сравнить теплоемкость C этого процесса с C_V .

$$(C > C_V).$$

2.25. Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется по закону $p^2 V = \text{const}$? Изобразить этот закон на диаграмме $(p - T)$. Считая этот процесс политропическим, определить, чему равен показатель политропы η . При расширении газа тепло подводится к нему или отводится от него? Сравнить теплоемкость C этого процесса с C_V .

$$(C > C_V).$$

2.26. В сосуде вместимостью $V = 10$ л находится идеальный газ под давлением $p_1 = 10^5$ Па. Стенки сосуда могут выдержать максимальное давление $p_2 = 10^6$ Па. Какое максимальное количество тепла Q можно сообщить газу? Показатель адиабаты $\gamma = 1,4$.

$$(Q = 23 \text{ кДж}).$$

2.27. Некоторую массу азота сжали в 5 раз (по объему) двумя разными способами: один раз изотермически, другой раз адиабатически. Начальное состояние газа в обоих случаях одинаково. Найти отношение соответствующих работ, затраченных на сжатие газа. Изобразить процессы в координатах $(P - V)$ и $(T - S)$.

$$(A_T/A_A = 0,712).$$

2.28. В бензиновом автомобильном двигателе степень сжатия горючей смеси равна 6,2. Смесь засасывается в цилиндр при температуре $t_1 = 15$ °С. Найти температуру t_2 горючей смеси к концу такта сжатия. Горючую смесь рассматривать как двухатомный идеальный газ, процесс считать адиабатным.

$$(t_2 = 324 \text{ °С}).$$

2.29. Тепловая машина работает по циклу Карно, КПД которого $\eta = 0,25$. Каков будет холодильный коэффициент $\kappa_{\text{хол}}$ машины, если она будет совершать тот же цикл в обратном направлении? Холодильным коэффициентом называется отношение количества теплоты, отнятого от охлаждаемого тела, к работе двигателя, приводящего в движение машину.

$$(\kappa_{\text{хол}} = 3).$$

2.30. Один моль одноатомного идеального газа совершает тепловой цикл Карно между тепловыми резервуарами с температурами $t_1 = 127^\circ\text{C}$ и $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Наименьший объем газа в ходе цикла $V_1 = 5$ л, наибольший – $V_3 = 20$ л. Какую работу A совершает эта машина за один цикл? Сколько тепла Q_1 берет она от высокотемпературного резервуара за один цикл? Сколько тепла Q_2 поступает за цикл в низкотемпературный резервуар?

$$(A = 807 \text{ Дж}, Q_1 = 3240 \text{ Дж}, Q_2 = 2433 \text{ Дж}).$$

2.31. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из изобары $p_1 = \text{const}$, изотермы $T_2 = \text{const}$, изобары $p_3 = \text{const}$ и изотермы $T_1 = \text{const}$. Следует считать, что $p_1 > p_3$, а $T_2 > T_1$. Найти термический КПД такой машины.

$$\left(\eta = \frac{T_2 \ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right) - T_1}{\ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right)(T_2 - T_1)} \right).$$

2.32. Найти КПД цикла, состоящего из двух изохор и двух изотерм, если в пределах цикла объем изменяется в k раз, а абсолютная температура в τ раз. Рабочим веществом является идеальный газ с показателем адиабаты γ .

$$\left(\eta = \frac{(\tau-1) \ln k}{\frac{\tau-1}{\gamma-1} + \tau \ln k} \right).$$

Энтропия

2.33. Какое количество тепла Q нужно сообщить 75 г водяных паров, чтобы нагреть их от 100 до 250 °C при постоянном давлении? Определить изменение энтропии водяного пара.

$$(Q = 20,8 \text{ кДж}; \Delta S = 47,5 \text{ Дж/К}).$$

2.34. Определить изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении кислорода массой $m = 10$ г от объема $V_1 = 25$ л до объема $V_2 = 100$ л.

$$(\Delta S = 3,6 \text{ Дж/К}).$$

2.35. Найти изменение ΔS энтропии при нагревании воды массой $m = 100$ г от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С и последующим превращении воды в пар той же температуры. Удельная теплоемкость воды $C = 4,18$ кДж/кг·К, удельная теплота парообразования воды 2250 кДж/кг.

$$(\Delta S = 737 \text{ Дж/К}).$$

2.36. Найти изменение ΔS энтропии при превращении массы $m = 200$ г льда, находившегося при температуре $t_1 = -10,7$ °С, в воду при $t_2 = 0$ °С. Теплоемкость льда считать не зависящей от температуры. Температуру плавления принять равной 273 К. $C = 2,1 \cdot 10^3$ Дж/кг·К; удельная теплота плавления льда $\lambda = 333 \cdot 10^3$ Дж/кг.

$$(\Delta S = m[C \cdot \ln(T_2/T_1) + \lambda/T_2] = 261 \text{ Дж/К}).$$

2.37. Один киломоль газа изобарически нагревается от 20 до 600 °С, при этом газ поглощает $1,20 \cdot 10^7$ Дж тепла. Найти:

- а) число степеней свободы молекулы газа i ;
- б) построить зависимость энтропии S как функцию от температуры T газа.

$$(i = 3).$$

III. Электричество и магнетизм

Электростатика. Диэлектрики

3.1. Шар радиусом R заряжен однородно с объемной плотностью ρ . Найти напряженность поля \vec{E} для точек внутри и вне шара.

$$\left(\vec{E} = \frac{\rho \cdot r}{3\epsilon_0} \vec{e}_r; \vec{E} = \frac{\rho \cdot R^3}{3\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r \right).$$

3.2. Бесконечно тонкая прямая нить заряжена однородно с плотностью λ . Найти напряженность электрического поля E и потенциал ϕ

как функции расстояния r от нити. Потенциал на расстоянии r_0 положить равным 0.

$$(E = (1/2\pi\epsilon_0) \cdot \lambda/r; \varphi = -(\lambda/2\pi\epsilon_0) \cdot \ln(r/r_0)).$$

3.3. Тонкий длинный стержень равномерно заряжен с линейной плотностью $\tau = 1,5$ нКл/см. На продолжении оси стержня на расстоянии $d = 12$ см от его конца находится точечный заряд $Q = 0,2$ мкКл. Определить силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.

$$(F = 2,25 \text{ мН}).$$

3.4. По тонкому проволочному кольцу радиусом $r = 60$ мм равномерно распределен заряд $q = 20$ нКл.

а) Приняв ось кольца за ось x , найти потенциал φ и напряженность поля \vec{E} на оси кольца как функцию x (начало отсчета x поместить в центр кольца).

б) Исследовать случаи $x = 0$ и $|x| \gg r$.

$$(\vec{E} = (1/4\pi\epsilon_0) \cdot \frac{q \cdot x}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \vec{e}_x; \varphi = (1/4\pi\epsilon_0) \cdot \frac{q}{\sqrt{r^2 + x^2}}).$$

3.5. Чему равен поток вектора E через поверхность сферы, внутри объема которой находится:

- а) заряд e ;
- б) заряд $-e$;
- в) диполь с моментом p_e .

Объяснить результат с помощью картины силовых линий электрического поля.

3.6. Металлический шар радиусом R помещен в однородное электрическое поле. Изобразить качественную картину силовых и эквипотенциальных линий электрического поля.

3.7. Два точечных заряда $+e$ и $-e$ расположены в точках с координатами $(a/2, 0, 0)$, $(-a/2, 0, 0)$. Построить качественно график зависимости проекции напряженности поля $E_x(x)$ для точек, лежащих:

- а) на оси x ($y = 0$);
- б) $y = 2a$.

3.8. Какая сила будет действовать на свободный диполь, электрический момент которого $p_e = 0,5 \cdot 10^{-10}$ Кл·м, если он расположен на

расстоянии $a = 0,3$ м от точечного заряда $q = 10^{-5}$ Кл? Считать плечо диполя значительно меньше расстояния a .

$$(F = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ Н}).$$

3.9. Потенциал поля, создаваемого некоторой системой зарядов, имеет вид $\varphi = a(x^2 + y^2) - bz^2$, где a и b – положительные константы. Найти напряженность поля \vec{E} и ее модуль $|\vec{E}|$. Построить графики зависимости $E_x = f(x)$, $E_z = f(z)$.

$$(E = 2\sqrt{a^2(x^2+y^2)+(bz)^2}; \vec{E} = -2a\vec{e}_x - 2ay\vec{e}_y + 2bz\vec{e}_z).$$

3.10. Плоский воздушный конденсатор подключили к батарее, а затем отключили от нее. После этого сдвинули пластины конденсатора, уменьшив расстояние между пластинами в 2 раза. Как изменится:

- энергия, запасенная конденсатором;
- заряд на обкладках конденсатора;
- плотность энергии электрического поля конденсатора?

3.11. Диэлектрическая пластина шириной $2a$ с проницаемостью $\varepsilon = 2$ помещена в однородное электрическое поле напряженности E , силовые линии которого перпендикулярны пластине.

- Изобразить на рисунке линии полей E и D электрического поля;
- Построить качественно графики зависимостей E_x , D_x от x (ось x перпендикулярна пластине, вектор E направлен вдоль оси x , точка $x = 0$ находится в середине пластины).

3.12. Диэлектрическая пластинка с проницаемостью $\varepsilon = 2$ помещена в однородное электрическое поле с напряженностью E . Линии поля E образуют некоторый угол φ с поверхностью пластины. Изобразить качественно линии полей E и D в вакууме и пластине. Построить качественно графики зависимостей $E_x = f(x)$ и $D = f(x)$.

3.13. Внутри плоской однородной диэлектрической пластины с $\varepsilon = 3$ вектор напряженности однородного электрического поля составляет угол φ с поверхностью пластины. Считая, что с одной стороны пластины вакуум, а с другой диэлектрик с $\varepsilon = 2$, изобразить качественно линии E и D электрического поля в трех указанных средах. Построить качественно зависимости $E_x = f(x)$ и $D_x = f(x)$. Ось Ox перпендикулярна поверхностям пластины, а ее толщина – d .

3.14. Плоский воздушный конденсатор опустили в воду так, что поверхность воды параллельна плоскостям пластин, а ее уровень расположен на расстоянии h от нижней пластины. Найти зависимость емкости конденсатора от величины h , если площадь пластины S , а расстояние между ними d .

$$(C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\varepsilon \cdot d - h(\varepsilon - 1)}).$$

3.15. Электрическое поле создается равномерно заряженным шаром радиусом R с объемной плотностью заряда ρ . Определить зависимость вектора электрического смещения электрического поля от r . Построить качественно график $D_r = f(r)$.

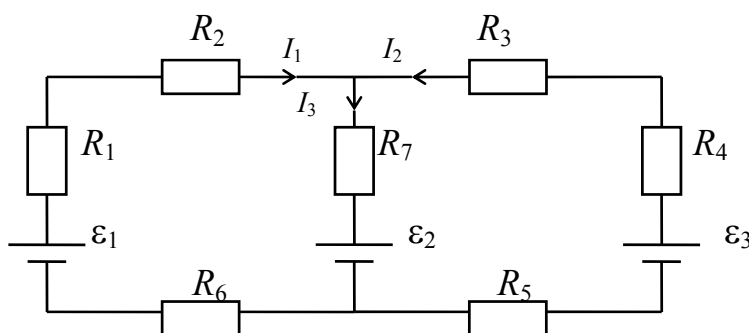
$$(D = (1/3)\rho r; D = (\rho/3) \cdot (R^3/r^2)).$$

Постоянный ток

3.16. Зазор между обкладками плоского конденсатора заполнен веществом с проницаемостью $\varepsilon = 7$ и удельным сопротивлением $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Емкость конденсатора $C = 3000 \text{ пФ}$. Найти силу тока утечки через конденсатор при подаче на него напряжения $U = 2000 \text{ В}$.

$$(I = 9,7 \cdot 10^{-7} \text{ А}).$$

3.17. В схеме, изображенной на рисунке, $\varepsilon_1 = 10 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 20 \text{ В}$, $\varepsilon_3 = 30 \text{ В}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 5 \text{ Ом}$, $R_6 = 6 \text{ Ом}$, $R_7 = 7 \text{ Ом}$. Внутреннее сопротивление источников тока пренебрежимо мало. Найти силы токов I_1, I_2, I_3 .



$$(I_1 = -1,02 \text{ А}; I_2 = 0,90 \text{ А}; I_3 = -0,12 \text{ А}).$$

3.18. Определить заряд Q , прошедший по проводу с сопротивлением $R = 3 \text{ Ом}$ при равномерном нарастании напряжения на концах провода от $U_0 = 2 \text{ В}$ до $U = 4 \text{ В}$ в течение 20 с .

$$(Q = 20 \text{ Кл}).$$

3.19. Сила тока в проводнике сопротивлением 20 Ом нарастает в течение времени $\Delta t = 2$ с по линейному закону от $I_0 = 0$ до $I_{\max} = 6$ А. Определить количество теплоты Q , выделившееся в этом проводнике за первую секунду.

$$(Q = 60 \text{ Дж}).$$

3.20. Концентрация электронов проводимости в меди $n = 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Считая условия нормальными, определить среднее время между двумя столкновениями электрона с решеткой (среднее время свободного пробега). Определить среднюю длину свободного пробега электрона. Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

$$(\lambda = 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}).$$

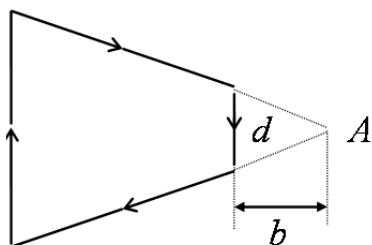
3.21. По медному проводнику сечением $0,2 \text{ мм}^2$ течет ток. Определить, какая сила действует на отдельный электрон проводимости со стороны электрического поля, если объемная плотность энергии, выделяемая в проводнике, равна $9 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$. Определить плотность тока и силу тока в проводнике.

$$(F = 19,8 \cdot 10^{-22} \text{ Н}; j = 7,3 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2; I = 0,15 \text{ А}).$$

3.22. Коэффициент теплопроводности материала некоторого проводника при нормальных условиях равен $390 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$. Этот проводник толщиной 2 мм^2 включен в электрическую цепь, и в нем установился ток $I = 4 \text{ А}$. Определить напряженность электрического поля в этом проводнике и разность потенциалов на расстоянии 1 м по длине проводника. Площадь поперечного сечения проводника – 2 мм^2 .

$$(E = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}).$$

Магнетизм



Основание трапеции $a = 100 \text{ мм}$, расстояние $b = 50 \text{ мм}$.

3.23. Ток силы $I = 1 \text{ А}$ циркулирует в контуре, имеющем форму равнобокой трапеции. Отношение оснований трапеции $\eta = 2 : 1$. Найти магнитную индукцию \vec{B} в точке A , лежащей в плоскости трапеции. Меньшее основание трапеции $a = 100 \text{ мм}$, расстояние $b = 50 \text{ мм}$.

$$(B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2Id}{b\sqrt{d^2 + 4b^2}} \cdot (1 - \frac{1}{\eta}) = 1,4 \text{ мкТл}).$$

3.24. В тонком проводнике, изогнутом в виде правильного шестиугольника со стороной $a = 20$ см, идет ток $I = 10$ А. Определить магнитную индукцию в центре шестиугольника.

$$(B = 34,8 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}).$$

3.25. Оценить индукцию магнитного поля B , создаваемого электроном в центре атома водорода, при движении электрона по первой боровской орбите, радиус которой $a = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м.

$$(B = 12,5 \text{ Тл}).$$

3.26. По витку радиусом $R = 10$ см течет ток $I = 50$ А. Виток помещен в однородное магнитное поле $B = 0,2$ Тл. Определить момент силы M , действующей на виток, если плоскость витка составляет угол $\varphi = 60^\circ$ с линиями индукции.

$$(M = 0,157 \text{ Н}\cdot\text{м}).$$

3.27. Обмотка соленоида содержит два слоя плотно прилегающих друг к другу витков провода диаметром $d = 0,2$ мм. Определить магнитную индукцию \vec{B} на оси соленоида, если по проводу течет ток $I = 0,5$ А.

$$(B = 6,28 \text{ мТл}).$$

3.28. По тонкому стержню длиной $l = 40$ см равномерно распределен заряд $Q = 60$ нКл. Стержень вращается с частотой $n = 12 \text{ с}^{-1}$ относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через стержень на расстоянии $a = l/3$ от одного из его концов. Определить магнитный момент P_m , обусловленный вращением стержня.

$$(P_m = 3,6 \cdot 10^{-8} \text{ А}\cdot\text{м}^2).$$

3.29. Заряд $Q = 0,1$ мкКл равномерно распределен по стержню длиной $l = 50$ см. Стержень вращается с угловой скоростью $\omega = 50$ рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Найти магнитный момент P_m , обусловленный вращением стержня.

$$(P_m = 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ А}\cdot\text{м}^2).$$

3.30. В одной плоскости с бесконечно длинным прямым проводом, по которому течет ток $I = 50$ А, расположена прямоугольная рамка так, что две ее большие стороны длиной $l = 65$ см параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из этих сторон равно ее ширине. Каков магнитный поток φ , пронизывающий рамку?

$$(\varphi = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}).$$

3.31. Стержень длиной $l = 20$ см заряжен равномерно распределенным зарядом с линейной плотностью $\tau = 0,2$ мкКл/м. Стержень вращается с частотой $n = 10$ с⁻¹ относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец. Определить магнитный момент P_m , обусловленный вращением стержня.

$$(P_m = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^2).$$

3.32. Диск с равномерно распределенным по его плоскости зарядом Q равномерно вращается вокруг оси, проходящей через центр диска перпендикулярно его плоскости, с частотой n . Радиус диска R . Найти магнитный момент диска относительно оси z .

$$(P_m = (1/2)Q\pi nR^2).$$

3.33. Чугунное кольцо имеет воздушный зазор длиной $l_0 = 5$ мм. Длина l средней линии кольца равна 1 м. Сколько витков N содержит обмотка на кольце, если при силе тока $I = 4$ А индукция B магнитного поля в воздушном зазоре 0,5 Тл? Напряженность поля в металле $H = 1,5 \cdot 10^3$ А/м. Рассеянием магнитного потока в воздушном зазоре пренебречь.

$$(N = 870).$$

3.34. На сердечнике в виде тора диаметром $d = 500$ мм имеется обмотка с числом витков $N = 1000$. В сердечнике сделана поперечная прорезь, в результате чего образовался воздушный зазор ширины $b = 1$ мм. При силе тока в обмотке $I = 0,85$ А напряженность поля в зазоре $H = 600$ кА/м. Определить магнитную проницаемость μ железа при этих условиях. Рассеянием поля у краев зазора пренебречь.

$$\left(\mu = \frac{(\pi d - b)H}{NI - bH} = 3,8 \cdot 10^3\right).$$

3.35. Тонкий металлический стержень длиной $l = 1,2$ м вращается с частотой $n = 120$ мин⁻¹ в однородном магнитном поле вокруг оси, перпендикулярной к стержню и отстоящей от одного из его концов на расстоянии $l_1 = 0,25$ м. Вектор \vec{B} параллелен оси вращения, $B = 0,1$ мТл. Найти разность потенциалов U , возникающую между концами стержня.

$$(U = 0,53 \text{ мВ}).$$

3.36. Обмотка соленоида содержит два слоя плотно прилегающих друг к другу витков провода диаметром $d = 0,2$ мм. Считая соленоид

бесконечно длинным, определить магнитную индукцию B и напряженность H на оси соленоида, если по проводу идет ток $I = 0,5$ А.

$$(B = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}; H = 5 \cdot 10^3 \text{ А/м}).$$

IV. Колебания, волны и оптика

Механические колебания и волны

4.1. Найти смещение от положения равновесия точки, отстоящей от источника колебаний на расстояние $l = \lambda/12$, для момента $t = T/6$. Амплитуда колебания $A = 0,05$ м. Начальная фаза равна нулю.

$$(0,043 \text{ м}).$$

4.2. Амплитуда гармонического колебания 5 см, период 4 с. Найти максимальную скорость колеблющейся точки и ее максимальное ускорение.

$$(V_{\max} = 7,85 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; a_{\max} = 12,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2).$$

4.3. Уравнение плоской волны имеет вид $y = 0,34 \cos(0,2t - 0,4x)$, где y – смещение частиц среды, и все числовые значения заданы в системе СИ. Записать числовые значения циклической частоты и периода колебаний, волнового числа, фазовой скорости и длины волны, а также максимальное значение смещения.

$$(\omega = 0,2 \text{ рад/с}; T = 31,4 \text{ с}; K = 0,4 \text{ м}; V = 0,5 \text{ м/с}; \lambda = 15,7 \text{ м}).$$

4.4. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью $V = 15$ м/с. Период колебания точек шнура $T = 1,2$ с. Определить разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний двух точек, лежащих на луче и отстоящих от источника волн на расстояниях $x_1 = 20$ м, $x_2 = 30$ м.

$$(\Delta\varphi = 200^\circ).$$

Электромагнитные колебания и волны

4.5. Уравнение изменения силы тока в колебательном контуре дается в виде $I = -0,02 \sin 400\pi t$ (А). Индуктивность контура 1 Гн. Найти:

- а) период колебаний;
- б) емкость контура;
- в) максимальную разность потенциалов на обкладках конденсатора.

$$(T = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; C = 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}; U_{\max} = 25,2 \text{ В}).$$

4.6. Уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре дано в виде $U = 50 \cdot \cos 10^4 \cdot \pi t$ (В). Емкость конденсатора составляет $9 \cdot 10^{-7}$ Ф. Найти:

- а) период колебаний;
- б) индуктивность контура;
- в) закон изменения со временем силы тока в цепи;
- г) длину волны, соответствующую этому контуру.

$$(T = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}; L = 1,13 \text{ мГн}; I = -1,4 \sin 10^4 \pi t \text{ А}; \lambda = 6 \cdot 10^4 \text{ м}).$$

4.7. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 7$ мкФ, катушки индуктивности $L = 0,23$ Гн и сопротивлением $R = 40$ Ом. Конденсатор заряжен количеством электричества $Q = 5,6 \cdot 10^{-4}$ Кл. Найти:

- а) период колебаний контура;
- б) логарифмический декремент затухания колебаний;
- в) уравнение зависимости изменения разности потенциалов на обкладках конденсатора от времени.

$$(T = 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \lambda = 0,7; U = 80 \exp(-87t) \cos(250 \pi t)).$$

4.8. В цепь переменного тока напряжением 220 В включены последовательно емкость C , активное сопротивление R и индуктивность L . Найти падение напряжения U_R на омическом сопротивлении, если известно, что падение напряжения на конденсаторе $U_C = 2U_R$ и падение напряжения на индуктивности $U_L = 3U_R$.

$$(U_R = 156 \text{ В}).$$

4.9. Цепь переменного тока образована последовательно включенными активным сопротивлением $R = 800$ Ом, индуктивностью $L = 1,27$ Гн и емкостью $C = 1,59$ мкФ. На зажимы подано 50-периодное действующее напряжение $U = 127$ В. Найти:

- а) действующее значение силы тока I_d в цепи;
- б) сдвиг по фазе между током и напряжением;
- в) действующее значение напряжений U_R , U_L и U_C на зажимах каждого из элементов цепи.

$$(I_d = 71 \text{ мА}; \Delta\varphi = -63^\circ; U_R = 57 \text{ В}, U_L = 28 \text{ В}, U_C = 142 \text{ В}).$$

Оптика

5.1. На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ падает по нормали монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина пленки d_{\min} ?

$$(d_{\min} = 0,113 \text{ мкм}).$$

5.2. Плоская световая волна длиной λ_0 в вакууме падает по нормали на прозрачную пластинку с показателем преломления n . При каких толщинах b пластинки отраженная волна будет иметь:

а) максимальную интенсивность;

б) минимальную интенсивность?

$$(а) b = (\lambda_0/2n)(m + 0,5) \quad (m = 1,2,3...); \quad б) b = (\lambda_0/2n)m \quad (m = 1,2,3...).$$

5.3. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ($\lambda = 630$ нм) видна в спектре 3-го порядка под углом $\varphi = 60^\circ$. Определить:

а) какая спектральная линия видна под этим же углом в спектре 4-го порядка;

б) какое число штрихов на 1 мм длины имеет дифракционная решетка.

$$(\lambda = 475 \text{ нм}; N = 460 \text{ мм}^{-1}).$$

5.4. Пластина кварца толщиной $d_1 = 1$ мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1 = 20^\circ$. Определить:

а) какова должна быть длина d_2 кварцевой пластинки, помещенной между двумя “параллельными” николями, чтобы свет был полностью погашен;

б) какой длины l трубку с раствором сахара концентрации $C = 0,4$ кг/л надо поместить между николями для получения того же эффекта.

$$\text{Удельное вращение раствора сахара } \alpha_0 = 0,665 \text{ град}/(\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}).$$

$$(d_2 = 4,5 \text{ мм}; l = 3,4 \text{ дм}).$$

5.5. Под каким углом к горизонту должно находиться солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, стали бы наиболее полно поляризованы, если скорость света в воде $2,26 \cdot 10^8$ м/с?

$$(\alpha = 37^\circ).$$

2.4.3. Контрольные задания

Таблица 1

Варианты задач к разделу «Механика» (РГР № 1)

Вариант	Номера задач				
1	1.1	1.16	1.22	1.44	1.65
2	1.2	1.17	1.23	1.45	1.66
3	1.3	1.18	1.25	1.46	1.67
4	1.4	1.19	1.26	1.47	1.68
5	1.5	1.20	1.27	1.48	1.69
6	1.6	1.21	1.28	1.49	1.70
7	1.7	1.16	1.29	1.50	1.71
8	1.8	1.17	1.30	1.51	1.71
9	1.9	1.18	1.31	1.52	1.65
10	1.10	1.19	1.32	1.53	1.66
11	1.11	1.20	1.33	1.54	1.67
12	1.12	1.21	1.34	1.55	1.68
13	1.13	1.16	1.35	1.56	1.69
14	1.14	1.17	1.36	1.57	1.70
15	1.15	1.18	1.37	1.58	1.71
16	1.1	1.19	1.38	1.59	1.71
17	1.2	1.20	1.39	1.60	1.65
18	1.3	1.21	1.40	1.61	1.66
19	1.4	1.16	1.41	1.62	1.67
20	1.5	1.17	1.42	1.63	1.68
21	1.6	1.18	1.43	1.64	1.69
22	1.7	1.19	1.22	1.45	1.70
23	1.8	1.20	1.23	1.46	1.71
24	1.9	1.21	1.25	1.47	1.71
25	1.10	1.16	1.26	1.48	1.65
26	1.11	1.17	1.27	1.49	1.66
27	1.12	1.18	1.28	1.50	1.67
28	1.13	1.19	1.29	1.51	1.68
29	1.14	1.20	1.30	1.52	1.69
30	1.15	1.21	1.31	1.53	1.70

Таблица 2

*Варианты задач к разделу
«Молекулярная физика и термодинамика» (РГР № 2)*

Вариант	Номера задач				
1	2.1	2.6	2.12	2.20	2.33
2	2.2	2.7	2.13	2.21	2.34
3	2.3	2.8	2.14	2.22	2.35
4	2.4	2.9	2.15	2.23	2.36
5	2.5	2.10	2.16	2.24	2.37
6	2.1	2.11	2.17	2.25	2.33
7	2.2	2.6	2.18	2.26	2.34
8	2.3	2.7	2.19	2.27	2.35
9	2.4	2.8	2.12	2.28	2.36
10	2.5	2.9	2.13	2.29	2.37
11	2.1	2.10	2.14	2.30	2.33
12	2.2	2.11	2.15	2.31	2.34
13	2.3	2.6	2.16	2.32	2.35
14	2.4	2.7	2.17	2.20	2.36
15	2.5	2.8	2.18	2.21	2.37
16	2.1	2.9	2.19	2.22	2.33
17	2.2	2.10	2.12	2.23	2.34
18	2.3	2.11	2.13	2.24	2.35
19	2.4	2.6	2.14	2.25	2.36
20	2.5	2.7	2.15	2.26	2.37
21	2.1	2.8	2.16	2.27	2.33
22	2.2	2.9	2.17	2.28	2.34
23	2.3	2.10	2.18	2.29	2.35
24	2.4	2.11	2.19	2.30	2.36
25	2.5	2.6	2.12	2.31	2.37
26	2.1	2.7	2.13	2.32	2.33
27	2.2	2.8	2.14	2.20	2.34
28	2.3	2.9	2.15	2.21	2.35
29	2.4	2.10	2.16	2.22	2.36
30	2.5	2.11	2.17	2.23	2.37

Таблица 3

Варианты задач к разделу «Электричество и магнетизм» (РГР № 3)

Вариант	Номера задач				
1	3.1	3.10	3.16	3.23	3.33
2	3.2	3.11	3.17	3.24	3.34
3	3.3	3.12	3.18	3.25	3.35
4	3.4	3.13	3.19	3.26	3.36
5	3.5	3.14	3.20	3.27	3.33
6	3.6	3.15	3.21	3.28	3.34
7	3.7	3.10	3.22	3.29	3.35
8	3.8	3.11	3.16	3.30	3.36
9	3.9	3.12	3.17	3.31	3.33
10	3.1	3.13	3.18	3.32	3.34
11	3.2	3.14	3.19	3.23	3.35
12	3.3	3.15	3.20	3.24	3.36
13	3.4	3.10	3.21	3.25	3.33
14	3.5	3.11	3.22	3.26	3.34
15	3.6	3.12	3.16	3.27	3.35
16	3.7	3.13	3.17	3.28	3.36
17	3.8	3.14	3.18	3.29	3.33
18	3.9	3.15	3.19	3.30	3.34
19	3.1	3.10	3.20	3.31	3.35
20	3.2	3.11	3.21	3.32	3.36
21	3.3	3.12	3.22	3.23	3.33
22	3.4	3.13	3.16	3.24	3.34
23	3.5	3.14	3.17	3.25	3.35
24	3.6	3.15	3.18	3.26	3.36
25	3.7	3.10	3.19	3.27	3.33
26	3.8	3.11	3.20	3.28	3.34
27	3.9	3.12	3.21	3.29	3.35
28	3.1	3.13	3.22	3.30	3.36
29	3.2	3.14	3.16	3.31	3.33
30	3.3	3.15	3.17	3.32	3.34

Таблица 4

Варианты задач к разделу «Колебания, волны, оптика» (РГР № 4)

Вариант	Номера задач			
1	4.1	4.5	4.8	5.1
2	4.2	4.6	4.9	5.2
3	4.3	4.7	4.9	5.3
4	4.4	4.5	4.8	5.4
5	4.1	4.6	4.8	5.5
6	4.2	4.7	4.9	5.1
7	4.3	4.5	4.9	5.2
8	4.4	4.6	4.8	5.3
9	4.1	4.7	4.8	5.4
10	4.2	4.5	4.9	5.5
11	4.3	4.6	4.9	5.1
12	4.4	4.7	4.8	5.2
13	4.1	4.5	4.8	5.3
14	4.2	4.6	4.9	5.4
15	4.3	4.7	4.9	5.5
16	4.4	4.5	4.8	5.1
17	4.1	4.6	4.8	5.2
18	4.2	4.7	4.9	5.3
19	4.3	4.5	4.9	5.4
20	4.4	4.6	4.8	5.5
21	4.1	4.7	4.8	5.1
22	4.2	4.5	4.9	5.2
23	4.3	4.6	4.9	5.3
24	4.4	4.7	4.8	5.4
25	4.1	4.5	4.8	5.5
26	4.2	4.6	4.9	5.1
27	4.3	4.7	4.9	5.2
28	4.4	4.5	4.8	5.3
29	4.1	4.6	4.8	5.4
30	4.2	4.7	4.9	5.5

2.5. ТЕСТЫ

Тесты предназначены, с одной стороны, для самоконтроля уровня усвоения учебного материала по физике, а с другой стороны, для оценки знаний студента преподавателем. Количество возможностей прохождения теста устанавливает преподаватель. Оценка за ответ зависит от сложности вопросов.

Студентам предлагаются вопросы следующих типов: множественный выбор (вопрос в закрытой форме), числовой вопрос, короткий ответ (вопрос в открытой форме), вложенные вопросы. Ниже приводятся примеры тестовых вопросов различного типа.

Примеры тестовых вопросов

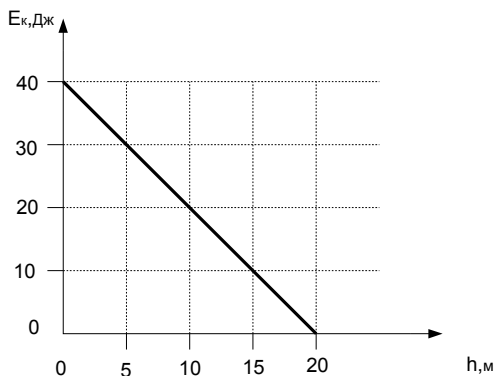
1. В электростатическом поле одиночного точечного заряда напряженность поля E изменяется с расстоянием r (от положения точечного заряда) по закону:

- 1) растет пропорционально $\sim r$;
- 2) уменьшается пропорционально $\sim 1/r$;
- 3) остается постоянной во всех точках поля;
- 4) растет пропорционально $\sim r^2$;
- 5) уменьшается пропорционально $\sim 1/(r^2)$.

2. Тело начинает двигаться вдоль прямой под действием только одной, направленной прямолинейно, силы, величина которой возрастает равномерно от 10 Н до 46 Н, и проходит 12 м. Работа этой силы равна

3. При распространении света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду под углом больше предельного $\alpha_{\text{пр}}$ может ли свет хотя бы частично проникать во вторую среду? (да, нет).

4. Небольшое тело брошено вертикально вверх. Зависимость величины кинетической энергии E_k тела от высоты h представлена на графике. Если не учитывать силу сопротивления воздуха, то высота, на которой кинетическая энергия тела будет в три раза больше потенциальной, равна:



- 1) 15 м;
- 2) 12,5 м;
- 3) 10 м;
- 4) 7,5 м;
- 5) 5 м;
- 6) 3,5 м.

Раздел 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

3.1. ВВЕДЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Главная роль в установлении физических закономерностей принадлежит эксперименту. Эксперимент – система логически связанных целенаправленных действий. В физике в основе опытов лежат методы измерений разнообразных величин, и поэтому центральным является понятие методики проведения измерений.

При измерениях физических величин выполняются три последовательные операции: 1) создание экспериментальных условий, 2) наблюдение, 3) отсчет.

Создание экспериментальных условий, при которых проводятся измерения (постоянная величина напряжения или давления, значительный перепад температур, малые крутильные колебания и т.д.), осуществляется с помощью приборов, специализированных установок, электрических схем и т.п.

Наблюдение определяется характером физического эксперимента: длительное наблюдение за процессом изменения физической величины, установление момента ее падения, например, до нуля и т.д.

Отсчет следует за наблюдением и производится, как правило, по шкале с некоторым масштабом. В результате появляются «первичные экспериментальные данные». Обработка результатов эксперимента позволяет определить измеряемую величину.

3.2. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Под измерением понимается сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения.

Измерения делятся на прямые и косвенные.

При *прямых измерениях* определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно или при помощи измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах. Примеры: измерение длины линейкой, измерение масс с помощью

набора разновесов на рычажных весах, измерение силы электрического тока амперметром.

При *косвенных измерениях* измеряемая величина вычисляется из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определенной функциональной зависимостью. Примеры: измерение скорости тела v с использованием формулы $v = s/t$, где s – пройденный телом путь за время t при равномерном прямолинейном движении; измерение скорости свободного падения g при колебаниях математического маятника по известной формуле $g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}$, где ℓ – длина математического маятника, T – период колебаний математического маятника. Величины s , t , ℓ , T определяются при прямых измерениях.

Физические величины являются вполне определенными, случайными (толщина пластины, разность температур, время между двумя событиями). Однако в процессе измерения из-за влияния различных случайных факторов (колебания почвы, перепады температуры и давления, изменение положения экспериментатора при отсчете по шкале и т.д.) результаты измерения – случайные величины. Основная задача при проведении измерений – указать наиболее точное значение измеряемой величины и ошибку (погрешность) измерения. Например, при измерении фокусного расстояния линзы f получено: $f = (81 \pm 1)$ мм. Это означает, что наиболее точное значение фокусного расстояния равно 81 мм, а ошибка определения f – 1 мм.

Величина погрешности используется при сравнительном анализе экспериментальных данных, позволяющем сделать обоснованный вывод. Например, необходимо установить, зависит ли сопротивление проволочной катушки от температуры. Измеренное сопротивление катушки оказалось равным 18,22 Ом при температуре 15 °С и 18,31 Ом при 25 °С. Следует ли придавать значение разнице этих величин? Если ошибка составляет 0,01 Ом, то разница значима, если ошибка равна 0,10 Ом, то незначима. Для первого случая можно сделать вывод: сопротивление катушки зависит от температуры. Во втором случае вывод таков: сопротивление катушки не зависит от температуры в пределах погрешности измерения.

Ошибки (погрешности) измерения делятся на два типа: систематические и случайные.

Систематическая ошибка – ошибка, которая остается постоянной на протяжении всей серии измерений. Систематические погрешности, как правило, обусловлены: 1) неисправностью измерительных приборов, 2) ошибочностью выбранного метода измерений, 3) упущениями со стороны наблюдателя. Их можно уменьшить, относясь критически к методам измерения и строго следя за исправным состоянием приборов. Если на измерительном инструменте не указана погрешность измерения, то за величину систематической ошибки принимается половина цены деления шкалы.

Случайная ошибка – ошибка, которая изменяется произвольным образом от одного измерения к другому, в равной степени может быть как положительной, так и отрицательной. Случайные ошибки оцениваются методами математической статистики. Рассмотрим некоторые положения этой теории.

Прямые измерения

Обозначим истинное значение некоторой физической величины через x . Результаты n отдельных измерений – x_1, x_2, \dots, x_n (случайные величины). Тогда абсолютной ошибкой Δx_i i -го измерения называется разность $\Delta x_i = x - x_i$. Абсолютные ошибки также являются случайными величинами. Огромное количество опытных фактов, накопленных в экспериментальной физике, позволяет установить два основополагающих предположения относительно абсолютных ошибок измерения:

1. При большом числе измерений случайные абсолютные ошибки одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто.

2. Большие (по абсолютной величине) погрешности встречаются реже, чем малые, т.е. вероятность появления погрешности уменьшается с ростом величины погрешности.

Эти два предположения лежат в основе теории ошибок.

Найдем наиболее точную оценку величины x . С этой целью проведем ряд преобразований. Величины отдельных измерений можно выразить так:

$$\begin{aligned}x_1 &= x - \Delta x_1; \\x_2 &= x - \Delta x_2; \\&\dots\dots\dots \\x_n &= x - \Delta x_n.\end{aligned}$$

Почленное сложение всех равенств дает $\sum_{i=1}^n x_i = nx - \sum_{i=1}^n \Delta x_i$.

Отсюда для x получим

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + (1/n) \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \langle x \rangle + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i,$$

где $\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – среднее арифметическое из n измерений.

Из предположения 1 при $n \rightarrow \infty$ следует: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$.

Поэтому при бесконечно большом числе измерений $x = \langle x \rangle$. Однако в реальном эксперименте число измерений всегда ограничено, т.е. $x \cong \langle x \rangle$. При обработке результатов измерений в качестве наиболее точного значения величины x принимается среднее арифметическое из n измерений.

Для оценки отклонения истинного значения x от среднего арифметического рассмотрим некоторые понятия теории вероятности.

Случайная величина может быть дискретной (выпадение герба монеты или какой-либо грани кубика при подбрасывании), т.е. принимать ряд дискретных значений, или непрерывной (температура в помещении).

Для дискретной величины: если в N опытах случайная величина появляется N_i раз, то вероятность P появления этой величины равна

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}.$$

Пример: если подбросить монету 10 раз, то пусть герб выпадет 3 раза и $v_i = 0,3$ ($v_i = N_i / N$ – относительная частота появления герба в опыте). Но если подбросить монету 10^5 раз, то v_i будет очень близко к 0,5. Если подбросить 10^{10} раз, то v_i будет еще ближе к 0,5. Таким образом, величина 0,5 – вероятность появления герба в опыте. Понятие вероятности справедливо для случайных процессов. Мы не знаем, случится ли данное событие (выпадение герба) при проведении опыта, но мы характеризуем появление этого события понятием вероятности и численным значением вероятности.

Если случайная величина x – непрерывная, то ставится вопрос: какова вероятность того, что случайная величина окажется в опыте в определенном бесконечно малом интервале dx около некоторого значения x_i (рис. 1)?

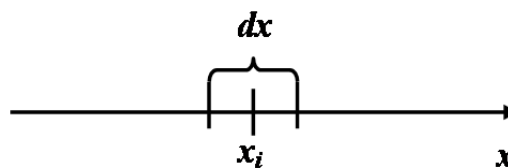


Рис. 1.

Эта вероятность пропорциональна ширине интервала dx и зависит от значения x_i , т.е. $dP(x) = y(x)dx$. За вероятность появления случайной величины x в интервале dx около значения x_i $dP(x_i) = y(x_i) dx$ принимают относительную частоту появлений этой величины в интервале dx около значения x_i , когда число измерений стремится к бесконечности.

Главную роль в описании случайной величины, распределенной непрерывно, играет функция $y(x)$, которая называется функцией распределения вероятностей.

В математической статистике показано, что при выполнении предположений 1 и 2 функция распределения имеет вид (на рис. 2 представлены графики этой функции при разных дисперсиях)

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\langle x \rangle)^2}{2\sigma^2}}, \text{ где } \sigma^2 \text{ – дисперсия распределения.}$$

Распределение случайной величины такого типа называется нормальным распределением, или распределением Гаусса.

Как видно из рис. 2, дисперсия показывает, насколько широко разбросаны значения случайной величины относительно среднего значения.

Из теории математической статистики следует, что при n измерениях наиболее точную оценку дисперсии дает выражение

$$\Delta S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \approx \sigma.$$

Величина ΔS_x называется среднеквадратичной погрешностью отдельного измерения. Она характеризует разброс результатов единичных измерений около среднего значения. Но главная цель – оценить, насколько среднее значение близко к истинному. Если для этого рассмотреть серии измерений из n_1 опытов, n_2 и т.д., то в каждой

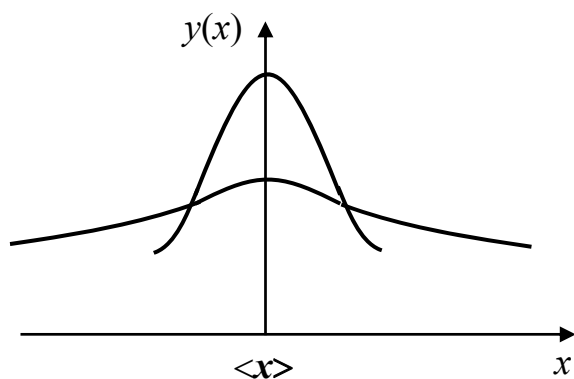


Рис. 2

серии можно определить $\langle x_1 \rangle$, $\langle x_2 \rangle$, $\langle x_3 \rangle$ и т.д. Эти средние значения будут отличаться друг от друга, и, более того, совокупность этих средних значений представляет собой набор случайных величин. Эти случайные величины также распределены по нормальному закону, который и будет характеризовать отличие $\langle x \rangle$ от истинного, но с другой дисперсией $\langle \sigma^2 \rangle$. В тео-

рии математической статистики показано, что наилучшей оценкой $\langle \sigma \rangle$ распределения средних значений является величина

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

Величина $\Delta S_{\langle x \rangle}$ называется среднеквадратичной погрешностью среднего. Величины σ и $\langle \sigma \rangle$ связаны соотношением $\langle \sigma \rangle = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, при-

чем σ – величина постоянная, так как характеризует разброс результатов отдельных измерений. Поэтому чем больше число измерений, тем меньше среднеквадратичная погрешность среднего $\langle \sigma \rangle$ и тем меньше различие между $\langle x \rangle$ и истинным значением x . При выполнении лабораторных работ число измерений обычно равно 5 – 10.

Характеристикой того, как сильно среднее арифметическое значение отличается от истинного, служит доверительный интервал, для которого известно, с какой вероятностью истинное значение может находиться внутри этого интервала. Величина этой вероятности выбирается экспериментатором и называется надежностью. При выполнении лабораторных работ рекомендуется надежность α , равная 0,95. Величина доверительного интервала Δx с заданной надежностью α равна

$$\Delta x = t_{\alpha}(n) \Delta S_{\langle x \rangle},$$

где $t_{\alpha}(n)$ – коэффициент Стьюдента, который можно найти в таблице для n измерений и надежности α . Окончательный результат записывается в форме $x = \langle x \rangle \pm \Delta x$ с надежностью α . При заметной величине систематической погрешности ошибки объединяют по формуле

$$\Delta x_{\text{общ}} = \sqrt{(\Delta x)^2 + \left(\frac{k_\alpha}{3}\right)^2 \delta^2},$$

где $k_\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} t_\alpha(n)$; δ – систематическая погрешность прибора.

Часто для оценки погрешности используют относительную ошибку E , которая определяется выражением $E = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}$ или, в процентах, $E = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} 100\%$.

Косвенные измерения

В математической статистике показано, что результат косвенных измерений $\langle z \rangle$ и погрешность косвенных измерений Δz (доверительный интервал), если зависимость имеет вид $z = f(x, y, \dots)$, определяются выражениями

$$\langle z \rangle = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \dots);$$

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots},$$

где $\langle x \rangle$, $\langle y \rangle$, ... – результат прямых измерений; Δx , Δy , ... – доверительные интервалы величин x , y , ..., полученных в прямых измерениях. Результаты косвенных измерений записываются окончательно в виде $z = \langle z \rangle \pm \Delta z$, $E = \frac{\Delta z}{\langle z \rangle} 100\%$.

Ниже в таблице представлены выражения $\langle z \rangle$ и Δz для ряда наиболее часто встречающихся зависимостей.

Выражения $\langle z \rangle$ и Δz для наиболее часто встречающихся зависимостей

Вид функции	Среднее значение	Погрешность (Δz либо $\frac{\Delta z}{z}$)
$z = x \pm y$	$\langle z \rangle = \langle x \rangle \pm \langle y \rangle$	$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$
$z = x \cdot y$ $z = x/y, z = y/x$	$\langle z \rangle = \langle x \rangle \cdot \langle y \rangle$ $\langle z \rangle = \langle x \rangle / \langle y \rangle, \langle z \rangle = \langle y \rangle / \langle x \rangle$	$\frac{\Delta z}{\langle z \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\langle x \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\langle y \rangle}\right)^2}$
$z = x^n$	$\langle z \rangle = (\langle x \rangle)^n$	$\frac{\Delta z}{\langle z \rangle} = n \cdot \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}$
$z = \ln x$	$\langle z \rangle = \ln \langle x \rangle$	$\Delta z = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}$
$z = e^x$	$\langle z \rangle = e^{\langle x \rangle}$	$\frac{\Delta z}{\langle z \rangle} = \Delta x$

Представление экспериментальных результатов

Полученные в опыте значения измеряемой величины заносятся, как правило, в таблицу либо представляются в виде графика. В таблице указываются единицы измерения физических величин и десятичный множитель.

№ п/п	Материал	σ , Н/м ²	$\Delta l/l_0$	$E \cdot 10^{-10}$, Н/м ²
1	Латунь			
2	Алюминий			

Представление результатов измерений в виде графиков необходимо для наглядности и определения ряда величин. Масштаб выбирается таким, чтобы, во-первых, экспериментальные точки не сливались, во-вторых, чтобы он обозначался простыми числами (10, 100, 0,1 и т.д. единиц соответствовали 1 см), в-третьих, занимал размеры около страницы. По осям откладываются деления и указываются символы величин и их единицы измерения. Погрешности изображаются в виде отрезков длиной в доверительный интервал. На рис. 3 представлен график зависимости углового ускорения ϵ от момента внешних сил M маятника Обербека,

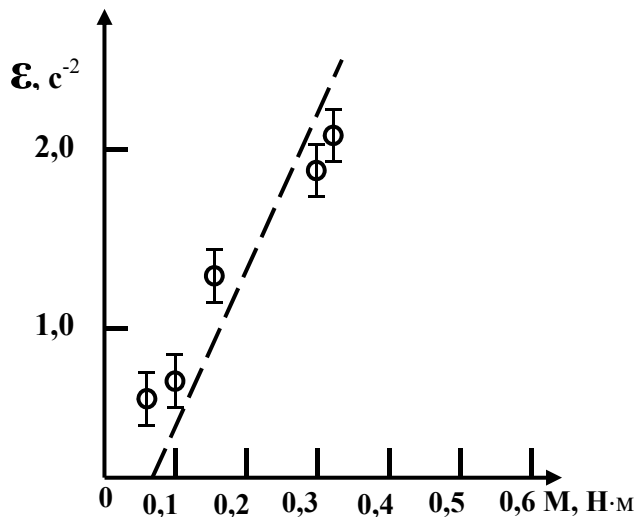


Рис. 3

Φ – экспериментальные точки
с указанием погрешности;
- - - – аппроксимирующая линия

полученный в лабораторной работе “Изучение динамики вращательного движения твердого тела”. Как Φ на нем обозначены экспериментальные точки с указанием погрешности.

В физике широко распространена линейная зависимость между величинами, в том числе и между теми, которые изучаются экспериментально. В этом случае наилучший вид аппроксимирующей прямой может быть

выбран методом наименьших квадратов. Рассмотрим его подробнее.

Пусть в эксперименте в n измерениях получены пары значений $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, отвечающие зависимости $y = ax + b$, параметры a и b которой должны быть найдены. Предполагается, что с погрешностями определена лишь совокупность значений y . Тогда отклонение в каждом i -м измерении значения аппроксимирующей прямой от экспериментально полученного y_i составляет $y_i - ax_i - b$. Наилучшие значения a и b выбираются так, чтобы сумма квадратов ошибки $S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2$ была минимальной. Из условия минимума следует

$$\frac{dS}{da} = \sum_{i=1}^n [-2x_i(y_i - ax_i - b)] = 0;$$

$$\frac{dS}{db} = \sum_{i=1}^n [-2(y_i - ax_i - b)] = 0.$$

Для определения a и b получается система из двух уравнений

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot n = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases}$$

Отсюда вытекают формулы для искоемых a и b :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}; \quad b = \langle y \rangle - a \langle x \rangle.$$

Приближенные вычисления

Результат измерений представляет собой приближенное число, точность которого определяется ошибкой.

Пусть, например, в опыте с математическим маятником погрешность определения ускорения свободного падения равна $0,05 \text{ м/с}^2$, а g равно $9,83 \text{ м/с}^2$. Результат записывается в виде $g = 9,83 \pm 0,05 \text{ м/с}^2$. Очевидно, что вычислять результат опыта с точностью до тысячных долей не имеет смысла, так как ошибка составляет сотые доли, и тем более бесполезно указывать тысячные доли при записи результата.

Полученное число (результат измерений) – приближенное, последняя цифра – сомнительная, а остальные верные. Так получается при любых измерениях.

При записи окончательного результата оставляют только значащие цифры (верные и сомнительную цифру). Если приближенное число входит в расчетную формулу, в нем сохраняют одну “неверную” цифру. Далее пользуются правилами вычислений с приближенными числами и правилами округления.

Контрольные вопросы

1. Как определяется величина систематической ошибки?
2. Как определяется величина случайной ошибки прямых измерений? На что указывает величина доверительного интервала?
3. Выразить доверительный интервал величины z , полученной при косвенных измерениях, через доверительные интервалы величин x, y, t, r, u, v, h , полученных в прямых измерениях для следующих зависимостей: а) $z = \pi r^2 \cdot h$; б) $z = r(x^2 - y^2)/t^4(u^2 - v^2)$; в) $z = x^2 \cdot \cos y$.
4. Как изобразится на графике погрешность величины, отложенной вдоль оси абсцисс?

Список рекомендуемой литературы

1. Деденко, Л. Г. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента / Л. Г. Деденко, В. В. Керженцев. – М. : МГУ, 1977. – 112 с.
2. Сквайрс, Дж. Практическая физика / Дж. Сквайрс. – М. : Мир, 1971. – 248 с.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
4. Лабораторный практикум по физике. Механика / под ред. А. А. Кулиша ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1992. – 68 с.
5. Методические указания к лабораторным работам по физике. Молекулярная физика / под ред. А. А. Кулиша ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1992. – 40 с.

3.3. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет студента по лабораторной работе составляется по следующей схеме: 1) *титульный лист*; 2) *цель работы*; 3) *оборудование*; 4) *теоретическое введение*; 5) *методика проведения эксперимента*; 6) *экспериментальная часть*; 7) *обработка результатов измерения*; 8) *выводы*.

Титульный лист оформляется на первой странице отчета (рисунок). В центральной части этой страницы указываются номер лабораторной работы и ее название. Ниже (справа) фамилия исполнителя, номер группы. В правом нижнем углу – три короткие строчки для подписи преподавателя: “к работе допущен”, “работа выполнена”, “работа защищена”. Со второй страницы следует описание остальных разделов отчета. Пункты 1 – 5 записываются в отчет до начала выполнения лабораторной работы, пункт 6 – в лаборатории, пункты 7 – 8 после получения экспериментальных данных.

Теоретический материал, схемы, рисунки должны быть представлены в отчете в объеме, необходимом для осмысленного выполнения лабораторной работы. Рисунки и схемы выполняются с применением чертежных принадлежностей. Графики представляются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет.

По заочной и дистанционной формам обучения на выполнение лабораторных работ выделяется малый объем учебных аудиторных часов. Поэтому студентам необходимо самостоятельно до начала занятий детально изучить описание лабораторной работы, используя дополнительно список рекомендуемой литературы. Качество своей подготовки студенты должны проверять, отвечая на контрольные вопросы. Домашняя самостоятельная подготовка студента “отражается” письменно в той части отчета, которая оформляется до начала выполнения лабораторной работы (пункты 1 – 5).

Пример оформления титульного листа к лабораторной работе № 1 – 5 изображен на рисунке.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Кафедра общей и прикладной физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1-5

**ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Студент группы ЗСуд-110
Петров Н. И.

К работе допущен
Работа выполнена
Работа защищена

Владимир 2013

3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. РАЗДЕЛ «МЕХАНИКА»

В лаборатории учащиеся применяют разнообразные измерительные инструменты в сочетании с действием автоматизированных установок. Лабораторные работы по механике направлены на освоение студентами методов статистической обработки данных физического эксперимента, исследования основных закономерностей поступательного и вращательного движения тел. Также изучаются свойства ряда важнейших механических величин.

Лабораторная работа № 1-1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: определение параметров распределения результатов измерений и получение приближенного вида функции распределения.

Оборудование: микрометр, штангенциркуль, набор цилиндров.

Введение

Набор цилиндров (100 – 200 шт.), используемый в данной лабораторной работе, – это совокупность одинаковых объектов, изготовленных в одинаковых условиях. Поэтому при измерении высоты (или диаметра) цилиндров, казалось бы, должна получаться одна и та же физическая величина. Однако в силу влияния большого количества причин, действующих случайно, совокупность высот цилиндров представляет собой набор случайных величин, моделирующих разброс результатов отдельных измерений в физическом эксперименте.

Это распределение характеризуется параметрами:

1) среднее арифметическое значение высоты $\langle h \rangle = \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \right)$;

2) дисперсия $\sigma^2 \cong \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \langle h \rangle)^2}{n}$;

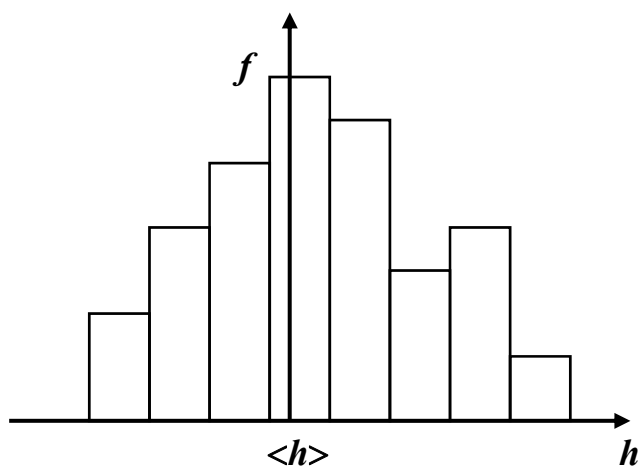
3) среднеквадратичная погрешность $\Delta S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \langle h \rangle)^2}{n}}$ (где n – число измерений).

Если бы число измерений было бесконечно большим, то $\langle h \rangle$ совпадало бы с истинным значением высоты цилиндра, а ΔS_n с σ . График распределения отдельных значений h_i относительно $\langle h \rangle$ имел бы вид, подобный рис. 2. на с. 110. Число измерений ограничено, но и в этом случае удается получить приближенный вид функции распределения результатов измерений, построив гистограмму (столбчатую диаграмму).

Для построения гистограммы необходимо отрезок $h_{\max} - h_{\min}$ (где h_{\max} – максимальное из измеренных значений высот цилиндра, h_{\min} – минимальное из измеренных значений высот цилиндра) разбить на N равных интервалов величины Δh , подсчитать число “попаданий” n_i значений высот цилиндров в каждый интервал и относительную частоту попаданий в каждый интервал $f_i = n_i/n$.

Если значение высоты цилиндра попадает на границу интервалов, то этот цилиндр учитывается в правом интервале. Для количественного сравнения кривой Гаусса с гистограммой в последней по оси ординат необходимо отложить величину оценки плотности вероятности каждого интервала $\frac{n_i}{n \Delta h}$. Прделанные разбиения и расчеты в табличной форме имеют вид:

Номер интервала	Интервал	n_i	$f_i = \frac{n_i}{n}$	$n_i/(n \cdot \Delta h)$
1	$h_{\min} \div h_1$	n_1	f_1	$f_1/\Delta h$
2	$h_1 \div h_2$	n_2	f_2	$f_2/\Delta h$
...
N	$h_{N-1} \div h_{\max}$	n_N	f_N	$f_N/\Delta h$



По значениям, представленным в таблице, строится гистограмма (изображена на рисунке). Как видно из рисунка, гистограмма – это совокупность прямоугольников, у которых одна сторона равна ширине интервала Δh (у всех одинакова), а вторая – частоте попадания значений высот цилиндров в соответствующий интервал.

Порядок выполнения работы

1. Измерить высоты 100 – 200 цилиндров и результаты внести в отчет.

2. Определить по полученным значениям высот цилиндров максимальное из измеренных значений высот цилиндров, минимальное из измеренных значений высот цилиндров, среднее значение высоты цилиндров, дисперсию распределения, среднеквадратичную погрешность распределения.

3. Разбить отрезок $h_{\max} - h_{\min}$ на 6 – 8 интервалов. Определить число попаданий и относительную частоту попаданий для каждого интервала. Полученные значения представить в табличной форме подобно таблице выше.

4. Построить гистограмму для распределения относительной частоты попаданий f_i на миллиметровой бумаге.

5. Построить гистограмму оценки плотности вероятности $n_i/(n \cdot \Delta h)$. Изобразить пунктиром там же Гауссову кривую по рассчитанным в п. 2 значениям $\langle h \rangle$ и σ^2 , воспользовавшись формулой

$$f(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(h-\langle h \rangle)^2}{2\sigma^2}}.$$

6. Сравнить Гауссову кривую с гистограммой оценки плотности вероятности и проанализировать полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Как построить гистограмму?
2. Чем определяется число интервалов, на которое разбивается отрезок $h_{\max} - h_{\min}$ при построении гистограммы?
3. Как в эксперименте добиться того, чтобы гистограмма точнее отображала функцию распределения результатов эксперимента?
4. Укажите способ определения дисперсии по известному виду кривой функции распределения.

Список рекомендуемой литературы

1. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М. : Наука, 1965. – 511 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.

3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.

4. Методические указания к лабораторным работам по физике с обработкой результатов экспериментов на персональном компьютере / сост. О. Я. Бутковский [и др.] ; под ред. В. С. Плешивцева ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1999. – 44 с.

Лабораторная работа № 1-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПИКНОМЕТРОМ

Цель работы: освоение методов точного взвешивания на аналитических весах, определение плотности твердых тел и типа вещества.

Оборудование: кусочки однородного твердого тела, аналитические весы типа “W”, пикнометр, разновес, сосуд с дистиллированной водой, фильтровальная бумага, термометр, пипетка.

Введение

Плотность ρ_T однородного вещества определяется отношением $\rho_T = \frac{m}{V}$, где m – масса вещества, V – объем. Масса вещества может быть найдена с помощью взвешивания тела на аналитических весах, объем – с помощью пикнометра и ряда операций взвешивания на аналитических весах.

В данной работе используются аналитические весы типа “W”, предельная нагрузка которых составляет 200 г, а точность отсчета – 0,1 мг. Основные правила взвешивания следующие:

1. Весы в свободном состоянии необходимо арретировать, т.е. поднять основную часть аналитических весов – коромысло. Арретирование производится медленно и плавно.

2. Грузы и разновесы помещаются и снимаются с чашек только после арретирования весов.

3. Измерения проводятся при выключенном арретире.

Пикнометр представляет собой стеклянный сосуд неизменного объема, на горлышко которого нанесена метка. Жидкость в пикнометре должна устанавливаться только на уровне метки. При выполнении лабораторной работы этого добиваются с помощью пипетки. Пикнометр используется для определения объема кусочков твердого тела. Если M – масса пикнометра с дистиллированной водой, а M' –

масса с водой и кусочками тела, то величина $M + m - M'$ представляет собой массу воды, вытесненную из пикнометра этими кусочками. По известной плотности дистиллированной воды $\rho_{\text{в}}$ объем V кусочков твердого тела определяется выражением $V = \frac{M + m - M'}{\rho_{\text{в}}}$, а искомая

плотность ρ_T формулой $\rho_T = \frac{m}{M + m - M'} \rho_{\text{в}}$.

Порядок выполнения работы

1. Набрать кусочки однородного твердого тела (кусочки проволоки) и поместить на одну из чашек аналитических весов. На другую чашку весов поместить разновесы. Взвесить кусочки твердого тела (определить величину m). Масса кусочков должна быть достаточно большой (вместе с пикнометром, наполненным водой, – около 200 г), чтобы разность в знаменателе выражения для ρ_T имела наименьшую ошибку.

2. Наполнить пикнометр дистиллированной водой до метки и взвешиванием определить массу M . Уровень воды должен доходить до метки нижним краем мениска. Воду добавлять и отбирать пипеткой. Капельки воды со стенок удалять встряхиванием пикнометра.

3. Поместить в пикнометр с водой кусочки твердого тела, отобрать воду пипеткой до метки и взвешиванием определить массу M' .

4. Вычислить плотность твердого тела, воспользовавшись формулой для ρ_T , измеренными средними значениями $\langle m \rangle$, $\langle M \rangle$, $\langle M' \rangle$ и значениями плотности дистиллированной воды при температуре измерений, взятыми из таблицы.

5. Вывести формулу расчета погрешности косвенных измерений плотности твердого тела $\Delta \rho_T$ и вычислить ее, предварительно найдя погрешности прямых измерений m , M , M' .

Определить тип твердого тела, используя таблицы плотности твердых тел (металлов).

Дополнительное задание

Учесть влияние выталкивающей силы воздуха, действующей согласно закону Архимеда, при взвешивании тела. Оценить величину поправки, обусловленной выталкивающей силой воздуха, к массе пикнометра с водой M , считая, что масса 1 см^3 воздуха – 0,0012 г.

Плотность дистиллированной воды при различных температурах приведена в таблице.

Плотность дистиллированной воды при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{г/см}^3$
15	0,99913	21	0,99802	27	0,99654
16	0,99897	22	0,99780	28	0,99626
17	0,99880	23	0,99757	29	0,99597
18	0,99862	24	0,99732	30	0,99567
19	0,99843	25	0,99707	31	0,99537
20	0,99823	26	0,99681	32	0,99505

Контрольные вопросы

1. Какое предельное значение может принимать масса пикнометра с водой и кусочками твердого тела M' в данной лабораторной работе?
2. Почему масса кусочков твердого тела, плотность которого определяется, должна быть достаточно большой?
3. Как учитывается температура окружающей среды при измерении плотности твердых тел пикнометром?
4. Как при взвешивании тела учесть влияние выталкивающей силы воздуха, действующей согласно закону Архимеда?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.
2. Лабораторный практикум по физике / под ред. А. С. Ахматова. – М. : Высш. шк., 1980. – 326 с.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.

Лабораторная работа № 1-3

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: изучение законов динамики поступательного равномерного и равноускоренного движения, определение ускорения свободного падения.

Оборудование: измерительная установка.

Введение

Рассмотрим поступательное движение двух грузов, перекинутых через блок (рис. 1). Нить принимается нерастяжимой; массой нити, моментом инерции блока и трением в оси блока пренебрегаем.

Пусть $m_1 > m_2$. Уравнения движения для этого случая выглядят следующим образом:

$$m_1 g - F_{\text{нат}} = m_1 a, \quad (1)$$

$$F_{\text{нат}} - m_2 g = m_2 a, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 – массы грузов; $F_{\text{нат}}$ – сила натяжения нити; a – ускорение грузов; g – ускорение свободного падения.

Из (1) и (2) получаем

$$g = \frac{a(m_1 + m_2)}{m_1 - m_2}. \quad (3)$$

Описание установки

Экспериментальная установка (машина Атвуда) изображена на рис. 2.

На вертикальной колонке 1, закрепленной на основании 7, три кронштейна: неподвижный нижний 6 и два подвижных – средний 5 и верхний 4. Основание оснащено регулируемыми ножками 8, которые позволяют выровнять положение прибора. Сверху на колонке закреплен ролик 3 и электромагнит (на рис. 2 не показан). Через ролик перекинута нить 2 с привязанными на ее концах одинаковыми грузами M . Электромагнит после подведения к нему питающего напряжения при помощи фрикционной муфты удерживает систему ролика с грузами в состоянии покоя.

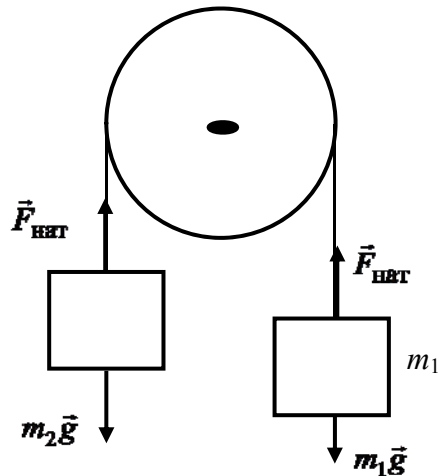


Рис. 1

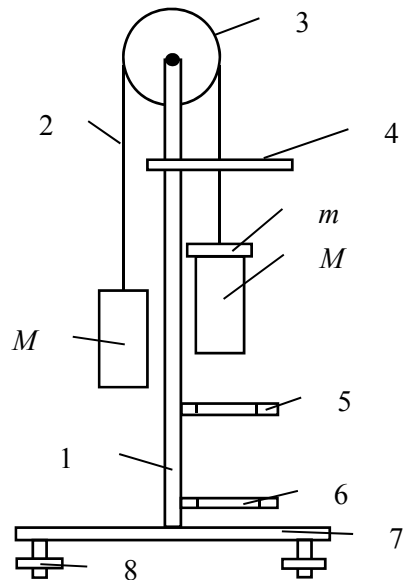


Рис. 2

Если на одну сторону блока прибавим небольшой груз массой m , тогда система грузов получит ускорение и, передвигаясь с этим ускорением, пройдет путь S_1 . На специальном кольце, закрепленном на среднем кронштейне, дополнительный груз будет отцеплен, и грузы пройдут уже равномерно путь S_2 .

На среднем и нижнем кронштейнах имеются фотоэлектрические датчики. При прохождении грузом положения датчика образуется электрический импульс, сигнализирующий о начале равномерного движения грузов и запускающий секундомер. После пересечения грузом линии фотоэлектрического датчика, закрепленного на нижнем кронштейне, соответствующий электрический импульс останавливает секундомер. Таким образом, автоматически определяется время прохождения t_2 грузами расстояния S_2 .

К концу равноускоренного движения грузы имеют ускорение a и скорость V , связанные соотношением $V = at_1$, отсюда

$$a = \frac{V}{t_1}. \quad (4)$$

Время t_1 можно определить из соотношения

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2}. \quad (5)$$

Со скоростью V система грузов проходит расстояние S_2 , соответственно:

$$V = \frac{S_2}{t_2}. \quad (6)$$

Из выражений (4) – (6) несложно получить

$$a = \frac{S_2^2}{(2S_1 \cdot t_2^2)}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), получим результирующее расчетное соотношение для получения ускорения свободного падения:

$$g = \frac{(2M + m)S_2^2}{(m \cdot 2S_1t_2^2)}. \quad (8)$$

Порядок выполнения работы

1. Проверить, находится ли система грузов M (без перегруза) в состоянии равновесия.

2. Установить верхний и средний кронштейны на заданные преподавателем положения (на кронштейнах имеются указатели положения).

3. Проверить, не задевают ли грузы M при движении кронштейны. Если задевают, то при помощи регулируемых ножек основания привести колонку прибора к вертикальному положению и отрегулировать положение кронштейнов.

4. Проверить визуально наличие и исправность заземления.

5. Подключить установку к сети питания. Переместить правый грузик в верхнее положение (нижний край груза на уровне риски на кронштейне). Нажать клавишу «Сеть», при этом при ненажатых клавишах «Пуск» и «Сброс» электромагнит с помощью фрикционной муфты должен застопорить ролик 3.

Положить на правый груз дополнительный кольцевой грузик («перегрузка»). Проверить, находится ли система в состоянии покоя (если система медленно перемещается, то можно слегка нажать на сердечник электромагнита).

6. Нажать на кнопку «Пуск» (система придет в движение). Записать измеренное значение времени движения грузика на пути S_2 . Нажать клавишу «Сброс». Поднять груз в первоначальное положение. Нажать на клавишу «Пуск» в «утопленном» положении, чтобы она перешла в нормальное («неутопленное») положение; ролик застопорится, и система будет готова к новым измерениям.

7. Повторить измерения с одним перегрузом 4 – 5 раз. Найти среднее значение времени движения $\langle t_2 \rangle$.

8. Найти массу перегруза m на аналитических весах (если он не маркирован). Измерить и записать значения S_1 и S_2 .

9. Рассчитать g по формуле (8).

10. Повторить измерения с другими перегрузами (по указанию преподавателя).

11. Найти среднее значение $\langle g \rangle$.

12. Рассчитать погрешность определения g как погрешность косвенных измерений.

$$\Delta g = \langle g \rangle \sqrt{\left(\frac{2\Delta M + \Delta m}{2M + m}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta S_2}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_2}{t_2}\right)^2}.$$

Дополнительное задание

Определить величину силы трения при измерении ускорения свободного падения на машине Атвуда.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Ньютона.
2. Какое движение называется равномерным, равноускоренным? Нарисовать графики зависимостей ускорения, скорости, пути от времени для равномерного и равноускоренного движения.
3. Как влияет на точность измерений величина расстояний S_1 и S_2 ? Величина перегрузки? Трение в блоке?
4. Почему измеренное ускорение свободного падения меньше, чем $9,8 \text{ м/с}^2$?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Механика : в 5 т. Т. 1 / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1979. – 519 с.
3. Каленков, С. Г. Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломахо. – М. : Высш. шк., 1990. – 112 с.

Лабораторная работа № 1-5

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель работы: экспериментальное изучение уравнения динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси и ознакомление с динамическим методом определения момента инерции твердого тела.

Оборудование: лабораторные установки с маятником Обербека в двух модификациях (тип установки указывает преподаватель).

1. «Механический» маятник Обербека с грузами, штангенциркуль, секундомер, масштабная линейка, весы с разновесами.
2. «Автоматический» маятник Обербека с грузами (с автоматической регистрацией времени движения грузов и автоматической установкой маятника), штангенциркуль.

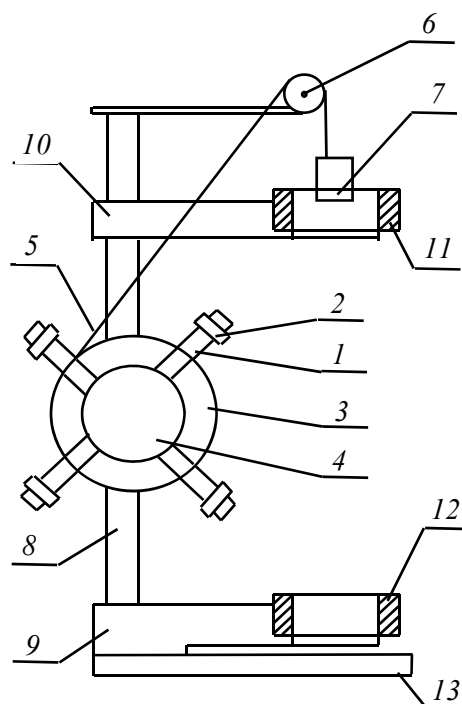
Введение

Уравнение вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси имеет вид

$$Y \varepsilon = M, \quad (1)$$

где M – сумма проекций на ось вращения всех моментов внешних сил, действующих на тело; Y – момент инерции твердого тела относительно неподвижной оси вращения; ε – угловое ускорение тела.

На рисунке приведена схема маятника Обербека, с помощью которого можно исследовать уравнение (1). Четыре спицы 1 соединены с втулкой резьбой под прямым углом, образуя крестовину. На спицах находятся цилиндрические грузы 2



На спицах находятся цилиндрические грузы 2

массой m_1 каждый. Передвигая эти грузы по спицам, можно изменить момент инерции крестовины, а также сбалансировать маятник. Втулка и два шкива 3, 4 радиусами r_1 и r_2 насажены на общую ось, которая закреплена в подшипниках так, что вся система может вращаться вокруг горизонтальной оси. К шкиву (3 или 4) прикреплена нить 5, которая перекинута через блок 6. К концу нити привязана легкая платформа 7 известной массы. На платформе размещаются грузы, которые натягивают нить и создают вращающий момент внешних сил $M = Tr$, где T – сила натяжения нити; r – радиус шкива. Силу T можно найти из уравнения движения платформы с грузом (в проекциях на вертикальную ось)

$$mg - T = ma,$$

где a – ускорение груза; m – масса платформы с грузом; g – ускорение свободного падения. Выразив отсюда T и подставив в выражение для M , получим

$$M = m (g - a) r. \quad (2)$$

Так как нить практически нерастяжима, то ускорение a связано с угловым ускорением ε соотношением $\varepsilon = a / r$. Ускорение груза, высота его падения h и время падения t связаны формулой для равно-

ускоренного движения $h = a t^2 / 2$. Выразив отсюда a и подставив его в формулу для ε и (2), получим

$$\varepsilon = 2 h / r t^2 = 4 h / D t^2; \quad (3)$$

$$M = m (g - 2 h / t^2) D / 2, \quad (4)$$

где D – диаметр шкива. По полученным значениям M и ε , используя (1), можно вычислить момент инерции маятника.

При учете сил трения на оси маятника Обербека уравнение, описывающее вращательное движение, принимает вид

$$Y \varepsilon = M - M_{\text{тр}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент силы трения.

Описание установки

1. «Механический» маятник Обербека изготовлен в виде переносного настольного прибора, схема которого соответствует рисунку. Маятник закреплен в металлическом каркасе так, что оси шкива 3 и блок 6 расположены на одном уровне, и нить 5 от шкива 3 до блока 6 идет горизонтально.

2. «Автоматический» маятник Обербека представляет собой переносной настольный прибор. С помощью двух кронштейнов – нижнего неподвижного 9 и верхнего подвижного 10 – маятник закреплен на вертикальной колонке 8 (см. рисунок). Основание колонны снабжено регулируемыми ножками, обеспечивающими горизонтальную установку прибора. Наверху колонны закреплен подшипниковый узел блока 6. На неподвижной втулке (закрытой шкивом 4) прикреплен тормозной электромагнит, который после подключения к нему напряжения питания удерживает с помощью фиксированной муфты систему крестовины вместе с грузами в состоянии покоя. Подвижный кронштейн 10 можно перемещать вдоль колонны и фиксировать его в любом положении, определяя, таким образом, длину пути падения груза h . Для отсчета длины пути на колонне нанесена миллиметровая шкала. На подвижном кронштейне размещен фотоэлектрический датчик 11, который (после нажатия клавиши «Пуск») запускает систему начала отсчета времени движения груза – схему работы миллисекундомера. На неподвижном кронштейне 9 закреплен фотоэлектрический датчик 12, вырабатывающий электроимпульс конца измерения времени движения груза и включающий тормозной электромагнит. К кронштейну 9 прикреплен кронштейн 13 с резиновым амортизатором, ограничивающим движение грузов. На основа-

нии прибора закреплен миллисекундомер, к гнездам которого подключены фотоэлектрические датчики 11, 12. На лицевой панели миллисекундомера расположены элементы управления:

1) «СЕТЬ» – выключатель сети. Нажатие клавиши вызывает включение напряжения питания (при повторном нажатии – выключение) и автоматическое обнуление прибора (все индикаторы высвечивают цифру нуль, и светят лампочки фотоэлектрических датчиков);

2) «СБРОС» – обнуление измерителя, при нажатии этой клавиши на табло секундомера будут высвечиваться нули;

3) «ПУСК» – управление электромагнитом. Нажатие клавиши вызывает освобождение электромагнита и генерирование импульса, разрешающего измерения.

Порядок выполнения работы

1. «Механический» маятник Обербека

1.1. С помощью регулируемых ножек прибора привести ось маятника в горизонтальное положение.

1.2. Провести балансировку маятника.

Для этого на двух противоположных спицах крестовины оставить по одному грузу m_1 на выбранных расстояниях R от оси вращения. Закрепив винтом на спице один из грузов на расстоянии R и передвигая второй груз на противоположной спице, добиться равновесия маятника и закрепить винтом в этом положении второй груз. Затем таким же образом сбалансировать грузы на второй паре спиц на таком же расстоянии от оси вращения. Если маятник сбалансирован, то он находится в безразличном равновесии. Внести R в протокол измерений.

1.3. Измерить диаметр шкива D и внести его в протокол измерений.

1.4. Намотать нить на шкив, поднимая платформу с грузом γ (m) на определенную высоту h (например, до уровня стола, на котором стоит прибор). Отпустить платформу с грузом с этой высоты, запуская одновременно секундомер. После прохождения платформой расстояния h остановить секундомер и занести время движения груза t в таблицу измерений.

С одним и тем же грузом рекомендуется проводить не менее трех измерений времени падения груза. Для расчета M и ε по формулам (3) и (4) берется среднее время движения данного груза.

1.5. Измерить M и ε для 5 – 6 разных грузов, постепенно нагружая платформу.

1.6. Построить график зависимости $\varepsilon (M)$ и проанализировать его.

1.7. Провести аппроксимирующую прямую, используя метод наименьших квадратов. Определить момент инерции маятника Обербека и момент сил трения, действующих на оси, согласно уравнению (5).

2. «Автоматический» маятник Обербека

2.1. Проверить надежность заземления прибора.

2.2. С помощью регулирующих ножек основания привести колонну прибора в вертикальное положение.

2.3. Сдвинуть верхний подвижный кронштейн 10 по колонне прибора 8 на выбранную высоту h и так установить, чтобы грузы 7, падая, проходили через середину рабочего окна фотоэлектрических датчиков. Занести h в протокол измерений.

2.4. Сбалансировать маятник (см. п. 1.2). При балансировке нужно следить, чтобы при вращении маятника грузы на спицах или винты, крепящие эти грузы, не задевали основание, на котором закреплен подшипниковый узел крестовины. По этой причине грузы на спицах нельзя сдвигать к оси вращения маятника ближе третьей (считая от оси вращения) риски на спицах.

2.5. Измерить диаметр шкива D (или получить его значение от преподавателя) и внести его в протокол измерений.

ВНИМАНИЕ! Шкивы пластмассовые, имеют тонкие ребра, между которыми двигается нить. Расстояние между ребрами такое, что в них губки штангенциркуля входят вплотную, и при неосторожном измерении (при перекосе штангенциркуля) эти ребра можно сломать.

2.6. Включить сетевой шнур в сеть питания.

2.7. Нажать клавишу «СЕТЬ», проверить, светятся ли лампочки индикаторов обоих фотоэлектрических датчиков; на табло миллисекундомера должны высвечиваться нули.

2.8. Нажать клавишу «ПУСК». При этом освободится блокировка движения тормозных электромагнитов.

2.9. Вращая крестовину против часовой стрелки и наматывая нить, перекинутую через блок 6 на шкив 3 или 4, поднять платформу с грузом 7 в верхнее положение, установив дно платформы точно на уровне с чертой на корпусе верхнего фотоэлектрического датчика.

Нажать клавишу «ПУСК» еще раз. В этом случае движение груза будет заблокировано тормозным электромагнитом, и груз должен находиться в состоянии покоя.

2.10. Нажать клавишу «ПУСК» повторно. Произойдет разблокировка движения тормозным электромагнитом, груз придет в движение и будет запущен секундомер, измеряющий время движения груза. При прохождении грузом окна нижнего фотоэлектрического датчика сработает механизм торможения груза, и на табло секундомера зафиксируется время движения груза. Занести это время в таблицу измерений. С одним и тем же грузом рекомендуется проводить не менее трех измерений времени падения.

2.11. Нажать клавишу «СБРОС». При этом произойдет сброс показаний секундомера (на табло секундомера будут высвечиваться нули) и освобождение блокировки движения тормозным электромагнитом.

2.12. Выполнить пункты 2.8 – 2.11 для 5 – 6 разных грузов, постепенно нагружая платформу.

Дополнительное задание

Изучить зависимость момента инерции маятника Y от расстояния R до оси вращения грузов m_1 на спицах при постоянной массе груза m на платформе. Построить график $Y = f(R^2)$. По графику определить Y_0 – момент инерции маятника без грузов m_1 на спицах.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения.
2. Что такое момент инерции? Как можно изменить момент инерции маятника Обербека в данной работе?
3. Что такое момент силы? Как в данной работе можно изменить момент силы, действующий на маятник Обербека?
4. Может ли влиять площадь платформы на общую величину момента сил трения?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.
2. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л. Л. Гольдина. – М. : Наука, 1983. – 425 с.
3. Каленков, С. Г. Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломахо. – М. : Высш. шк., 1990. – 112 с.

Лабораторная работа № 1-9
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА МЕТАЛЛОВ
МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: изучение деформации сдвига металлов.

Оборудование: крутильный маятник, электронная установка, миллиметровая линейка, технические весы, микрометр, электрический секундомер.

Введение

Деформация – это изменение формы и размеров тела под действием внешних сил. Если после прекращения действия внешних сил тело полностью восстанавливает свою первоначальную форму, то такие деформации называются абсолютно упругими. Различают два вида деформаций: деформация растяжения (сжатия) и деформация сдвига. При деформации сдвига все плоские слои твердого тела, параллельные некоторой плоскости, смещаются параллельно друг другу, не искривляясь и не изменяясь в размерах.

Возникающие в твердом теле при деформации упругие силы подчиняются закону Гука, который в относительной форме для деформации сдвига можно сформулировать следующим образом: относительная деформация сдвига прямо пропорциональна приложенному касательному напряжению. Для небольших деформаций, которые можно считать абсолютно упругими, величина относительной деформации равна $\Delta l / L$ (рис. 1). Тогда закон Гука для деформации сдвига имеет вид

$$\Delta l / L = \Psi = P_r / G, \quad (1)$$

Δl где P_r – приложенное касательное напряжение; G – модуль сдвига.

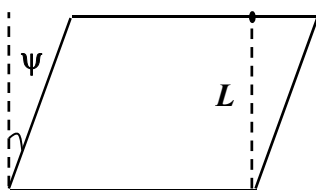


Рис. 1

Поскольку деформация при кручении есть деформация сдвига, то, изучая крутильные колебания, можно определить основную характеристику упругих свойств при сдвиге – модуль сдвига.

Описание установки

Крутильный маятник, с помощью которого изучаются крутильные колебания, состоит из твердого тела, подвешенного на вертикальной тонкой нити или стержне (рис. 2). При отклонении стержня из положения равновесия в нем будут возникать упругие силы деформации сдвига, направленные к положению равновесия. Если запи-

сать основной закон динамики вращательного движения для такой системы с учетом того, что угловое ускорение равно $d^2\Psi/dt^2$, то уравнение движения будет аналогично уравнению свободных незатухающих колебаний

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

где $\omega_0^2 = D/Y$, $T_0 = 2\pi\sqrt{Y/D}$;

Y – момент инерции тела,

$D = \pi d^4 G/32L$; T_0 – период

собственных колебаний; L –

длина стержня; d – диаметр проволоки.

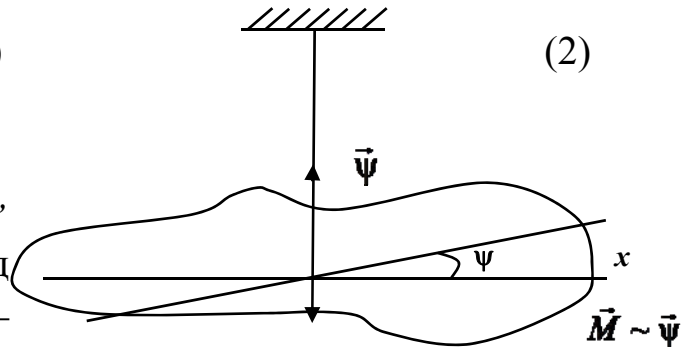


Рис. 2

Таким образом, измерив период колебаний и определив момент инерции тела, можно найти модуль сдвига.

Если определение периода не составляет труда, то измерение момента инерции затруднительно, поскольку практически невозможно учесть все детали установки при вычислении момента инерции.

Эту трудность можно обойти, если учесть следующее: а) момент инерции – величина аддитивная, т.е. момент инерции всей установки равен сумме моментов инерций всех ее частей; б) теорема Штейнера связывает моменты инерции тела относительно параллельных осей. Исходя из этого момент инерции всего тела можно представить как сумму

$$Y = Y_0 + \tilde{Y}, \quad (3)$$

где Y_0 – момент инерции какой-то эталонной части твердого тела; \tilde{Y} – момент инерции всего остального.

Тогда, определяя периоды колебаний для двух различных эталонных тел или для двух положений эталонного тела относительно оси вращения, можно, вычитая, исключить \tilde{Y} .

В данной работе реализуются два способа определения модуля сдвига.

При первом способе используется “механическая” установка, в ней маятник представляет собой подвешенный на тонкой металлической проволоке диаметром d стержень, вдоль которого перемещаются два калиброванных груза массой m (рис. 3).

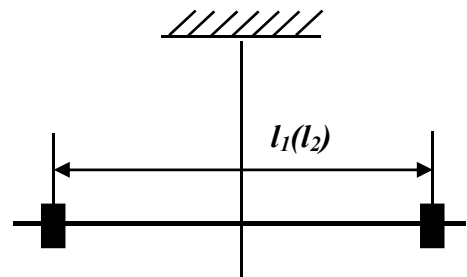


Рис. 3

Тогда, измеряя периоды колебаний для двух различных положений груза l_1 и l_2 , и находя разность моментов инерции для этих двух положений, получим выражение модуля в сдвиге в виде

$$G = 64\pi m L \frac{(l_1^2 - l_2^2)}{d^4 (T_1^2 - T_2^2)}. \quad (4)$$

Второй способ реализован с помощью электронной установки ФРМ-05, которая представляет собой рамку для крепления эталонных тел правильной формы, подвешенную на тонкую металлическую нить. Изменяя периоды колебаний для двух тел с известными моментами инерции или для одного тела относительно двух различных главных осей инерции, получим

$$Y_1 = Y_0 + Y_{\text{э}1}, \quad Y_2 = Y_0 + Y_{\text{э}2}. \quad (5)$$

Тогда $Y_{\text{э}1} - Y_{\text{э}2} = Y_1 - Y_2 = \frac{D}{4\pi^2} (T_1^2 - T_2^2)$, а выражение для вычисления модуля сдвига будет иметь вид

$$G = \frac{128 \pi L}{d^4} \left(\frac{Y_{\text{э}1} - Y_{\text{э}2}}{T_1^2 - T_2^2} \right). \quad (6)$$

Из (4) видно, что для определения модуля сдвига необходимо измерить длину проволоки L , ее диаметр d , массу одного груза m , расстояния l_1 и l_2 между центрами грузов и соответствующие периоды T_1 и T_2 . Для второго способа (формула (6)) вычисляются по формулам моменты инерции, например, двух различных осей инерции и измеряются соответствующие периоды T_1 и T_2 .

Порядок выполнения работы

Задание 1 (по первому способу)

1. Измерить длину L и диаметр проволоки d с помощью микрометра или штангенциркуля.
2. Измерить массу одного груза.
3. Установить грузы на расстоянии l_1 между центрами так, чтобы они были симметричны относительно проволоки.
4. Измерить период колебаний T_1 . Для этого измерить время, в течение которого произойдет n полных колебаний, и разделить на n . Повторить измерения 5 – 7 раз.
5. Таким же образом измерить период T_2 .
6. Результаты измерений занести в таблицу.

7. Вычислить погрешности измерения периодов как результаты прямых измерений.

8. По формуле (4) определить модуль сдвига.

9. Найти погрешности измерений ΔG как результат косвенных измерений и занести в таблицу.

№ п/п	$l_1 =$			$l_2 =$			Примечание
	$T_{1i} = \frac{t_1}{n}$	ΔT_{1i}	$(\Delta T_{1i})^2$	$T_{2i} = \frac{t_2}{n}$	ΔT_{2i}	$(\Delta T_{2i})^2$	
1							
2							
...							
Среднее			$\frac{\sum(\Delta T_{1i})^2}{N}$			$\frac{\sum(\Delta T_{2i})^2}{N}$	

Задание 2 (по второму способу)

1. Измерить длину L и диаметр проволоки d с помощью микрометра или штангенциркуля.

2. Измерить массу предложенного эталонного тела.

3. Вычислить момент инерции тела относительно двух главных осей инерции, измерив для этого необходимые величины.

4. Определить погрешность в определении момента инерции.

5. Измерить периоды T_1 и T_2 для соответствующих моментов инерции, как и в задании 1 п. 4. Правила работы с установкой РРМ-05 смотреть в работе 1 – 7 или в описании установки.

6. Результаты измерения занести в таблицу.

7. Найти погрешность измерений T_1 и T_2 .

8. По формуле (6) определить модуль сдвига.

9. Найти погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Можно ли в качестве эталонного тела использовать: а) шар; б) куб?

2. Используя основные законы динамики вращательного движения и закон Гука, получите формулы (2), (4), (6).

3. Как будет зависеть погрешность измерений от массы грузов (качественно)?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.
2. Стрелков, С. П. Механика / С. П. Стрелков. – М. : Наука, 1975. – 560 с.
3. Методические указания к лабораторным работам по физике. Механика / под ред. Н. Г. Конопасова ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1983. – 45 с.

Лабораторная работа № 1-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА МЕТОДОМ РАСТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ

Цель работы: исследование зависимости деформации металлов от приложенного напряжения в области других деформаций.

Оборудование: лабораторная установка для растяжения образцов, масштабная линейка, штангенциркуль или микрометр, технические весы и разновесы.

Введение

Под действием приложенных сил тела деформируются, т.е. изменяют свою форму или объем. Деформации делятся, главным образом, на упругие и пластические. Упругими называются такие деформации, которые исчезают полностью после прекращения действия на твердое тело сил. Если тело остается деформированным и при отсутствии сил, то такие деформации называются пластическими, или остаточными. Степень деформации характеризуется величиной ε – относительной деформацией. Для однородного стержня, прямолинейного отрезка проволоки и т.д. относительную деформацию можно определить как отношение удлинения стержня Δl к величине первоначальной длины l_0 : $\varepsilon = \Delta l / l_0$. В этом случае напряжение определяется как отношение величины растягивающей силы F_n , приложенной перпендикулярно к поперечному сечению стержня, к площади поперечного сечения стержня S_n : $\sigma = F_n / S_n$. При упругих деформациях существует однозначная зависимость между напряжением и относительной деформацией. При пластических деформациях такая однозначная связь отсутствует.

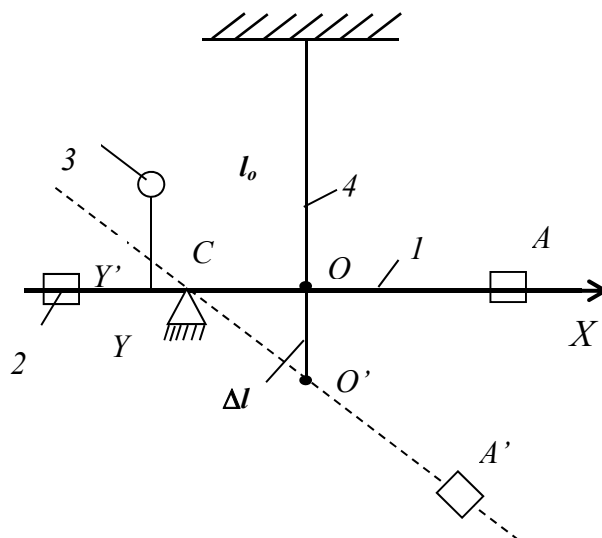
При малых упругих деформациях, которые встречаются наиболее часто, связь между напряжением и деформацией описывается законом Гука:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, важнейшая постоянная, характеризующая упругие свойства вещества. Модуль Юнга зависит от типа твердого тела и его физического состояния (например, температуры). В данной лабораторной работе определяется модуль Юнга различных металлов.

Описание установки

Для определения модуля Юнга используется установка, схема которой представлена на рисунке. Она состоит из рычага 1, закрепленного в шарнире в точке C , неподвижного груза 2, регулирующего первоначальную нагрузку, подвижного груза A , задающего величину напряжения в данной установке, и измерительного инструмента 3, в точке Y соприкасающегося с рычагом. Проволочный образец 4 одним концом жестко закрепляется в неподвижной стойке (на рисунке не показано), а другим, к которому прикладывается растягивающая сила, в точке O прикрепляется к рычагу 1. На рисунке сплошным отрезком YA показано положение рычага, когда образец не растянут и показание индикатора N (в миллиметрах) равно нулю. Пунктирным отрезком $Y'A'$ показано положение рычага, когда из-за смещения A напряжение отлично от нуля и образец 4 растягивается на величину Δl . Из подобия треугольников COO' и CYY' следует



$$\Delta l = \frac{OC}{YC} YY' = \frac{OC}{YC} N,$$

где N уже отлично от нуля.

Отсюда для относительной деформации имеем

$$\varepsilon = \frac{OC}{YC} \frac{N}{l_0}.$$

Величина растягивающей силы F_n определяется разностью сил, приложенных к проволочному образцу в точке O для двух положений подвижного груза A и A' , т.е. $F_n = F' - F$.

По правилу рычага в равновесии имеем

$$F = mg \left(1 + \frac{OA}{OC} \right) - F_0; \quad F' = mg \left(1 + \frac{O'A'}{OC} \right) - F_0,$$

где m – масса подвижного груза A ; F_0 – добавка, обусловленная влиянием неподвижного груза 2. Окончательно для силы растягивания

$$F_n = mg \left(\frac{O'A' - OA}{OC} \right), \quad \text{а для напряжения } \sigma = \frac{mg}{S_n} \left(\frac{O'A' - OA}{OC} \right).$$

Из приведенной формулы следует, что на данной установке возможно изменение величины σ простым способом: изменением величины разности $O'A' - OA$, что и используется в лабораторной работе. Для удобства расчетов вводится ось OX вдоль рычага, как показано на рисунке. Тогда, обозначив OA через X_0 , а $O'A'$ через X , получим

$$O'A' - OA = \Delta X = X - X_0, \quad \sigma = \frac{mg}{S_n} \cdot \frac{\Delta X}{OC}.$$

Порядок выполнения работы

1. Настроить установку. Для этого груз A расположить так, чтобы OA (X_0) равнялось 5 – 6 см. Конец O проволочного металлического образца вставить в пазы рычага и стойки. Устанавливая груз 2, добиться того, чтобы показание индикатора 3 равнялось нулю.

2. Измерить параметры установки: величины отрезков OC , YC и массу груза A .

3. Измерить параметры образца: l_0 (первоначальная длина) и d (диаметр).

4. Изучить зависимость ε от σ . Для этого перемещать груз A от начального положения X_0 до конца рычага 1 (нагрузка) и обратно (разгрузка) к первоначальному положению ступенчато через 2 см, занося результаты измерений в таблицу. В таблицу также рекомендуется заносить и результаты расчетов Δl , F_n , ε , σ .

№ п/п	Положение груза ΔX , см	Показание индикатора N , деления	Удлинение Δl , м	Растягивающая сила F_n , Н	$\varepsilon = \Delta l / l_0$	$\sigma = F_n / S_n$, Н/м ²
1						
2						
.						
.						

5. Построить график зависимости ε от σ . Проанализировать полученную зависимость.

6. Выделить на графике прямолинейный участок, и для экспериментальных точек, составляющих этот участок, методом наименьших квадратов (см. пункт 3.2. «Элементарная обработка результатов физического эксперимента») найти модуль Юнга металлического образца.

7. Вставить новый проволочный образец из другого металла. Выполнить пп. 3 – 6.

8. Сравнить и проанализировать полученные значения модуля Юнга, ход зависимости ε от σ для разных металлов.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется область деформаций, соответствующих закону Гука?

2. Почему начальное положение X_0 груза A выбирается отличным от нуля?

3. Почему на графике зависимости $\varepsilon(\sigma)$ часть экспериментальных точек не ложится на прямолинейный участок?

4. От чего зависит величина модуля Юнга твердого тела?

Список рекомендуемой литературы

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1979. – § 73.

2. Стрелков, С. П. Механика / С. П. Стрелков. – М. : Наука, 1965. – § 81.

3. Методические указания к лабораторным работам по физике. Механика / под ред. Н. Г. Конопасова ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1983. – 45 с.

3.5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. РАЗДЕЛ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

В лабораторных работах, посвященных данному разделу физики, учащиеся знакомятся с особенностями процессов, протекающих в молекулярных системах, и осваивают методы определения важнейших параметров, характеризующих жидкое и газообразное состояния вещества. Студентам рекомендуется четко разделять при действии установок стационарные процессы, неравновесные процессы и равновесные состояния.

Лабораторная работа № 2-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ И ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА МЕТОДОМ ПАДАЮЩЕГО В ЖИДКОСТИ ШАРИКА

Цель работы: исследование характера движения тела в вязкой жидкости.

Оборудование: длинный цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью и двумя кольцевыми метками, набор шариков, микрометр, секундомер, линейка, термометр.

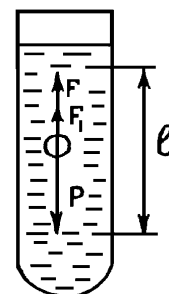
Введение

Силы, действующие на движущееся в жидкости тело, в значительной степени зависят от свойств жидкости. При безотрывном плавном обтекании тела идеальной жидкостью сила лобового сопротивления равна нулю («парадокс» Даламбера). Обтекание тела вязкой жидкостью приводит к возникновению пограничного слоя, в котором заметно влияние сил вязкости, отрыву потока за телом и колебаниям потока из-за вихреобразования. В общем случае сила лобового сопротивления такого обтекания обусловлена: 1) касательными силами вязкости к поверхности тела; 2) перепадом давлений из-за отрыва потока; 3) колебаниями давления вследствие вихреобразования за телом. Какая из составляющих дает наибольший вклад в величину силы лобового сопротивления в первую очередь, определяется значением критерия подобия – числом Рейнольдса: $R_e = \rho l v / \eta$, где ρ – плотность жидкости; v – характерная скорость потока; l – характерный размер; η – коэффициент вязкости жидкости. При малых скоростях потока жидкости, а следовательно, при малых числах Рейнольдса

главную роль играют силы вязкого трения. Стокс показал, что при движении тела в форме шара в вязкой жидкости вдали от стенок сосуда и поверхностей других тел сила лобового сопротивления F_c имеет вид

$$F_c = 6\pi\eta v r, \quad (1)$$

где r – радиус шара. Формула Стокса (1) применима при условии $Re \ll 1000$. Как видно из выражения (1), медленное движение тела в вязкой жидкости может быть использовано для определения величины коэффициента вязкости жидкости. Это осуществляется в установке, представленной на рисунке.



В широкий вертикально расположенный сосуд налита исследуемая жидкость. На сосуде по объему жидкости сделаны две горизонтальные метки, расстояние между которыми l . Метки достаточно далеко отстоят от дна и верхней кромки жидкости. В сосуд опускают металлический шарик массой m и плотностью ρ_M с начальной скоростью, равной нулю. Как видно из рисунка, на шарик действуют три силы: сила тяжести P , сила лобового сопротивления вязкой жидкости F_1 и выталкивающая сила Архимеда F . На начальном участке движение шарика ускоренное. Но так как с увеличением скорости растет сила лобового сопротивления, вскоре сумма всех сил, действующих на шарик, будет равна нулю, и шарик будет падать с постоянной скоростью. Участок длины l , на котором шарик движется равномерно, выделяется метками. Проекция суммы всех сил на вертикальную ось дает выражение

$$mg - F - F_1 = 0,$$

где $mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_M g$, $F = 6\pi\eta u_0 r$, $F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_J g$; u_0 – скорость равномерного перемещения шарика; ρ_J – плотность жидкости.

Таким образом

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_M g - 6\pi\eta u_0 r - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_J g = 0.$$

Отсюда получается выражение для коэффициента вязкости жидкости

$$\eta = \frac{2(\rho_M - \rho_J)gr^2}{9u_0}.$$

Если учесть, что $u_0 = l/\tau$, где τ – время равномерного перемещения шарика между метками, то окончательное выражение для вязкости

$$\eta = \frac{2(\rho_M - \rho_J)gr^2\tau}{9l}. \quad (2)$$

Условие применимости формулы (2): $Re \ll 1000$ (см. выше). Это накладывает ограничения на размеры падающего шарика:

$$r \ll \left(\frac{9}{2} \frac{\eta^2}{\rho_M \rho_J g} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

если пренебречь архимедовой силой.

Порядок выполнения работы

1. Выбрать из наборов шаров известной плотности один и измерить его диаметр несколько раз (плотность стали – $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность свинца – $11,3 \cdot 10^3$ кг/м³).

2. Установить метки на стеклянном сосуде достаточно далеко от края жидкости и дна. Измерить расстояние между метками.

3. Опустить шарик в жидкость известной плотности. При пролете шарика мимо верхней метки включить секундомер. При пролете шарика мимо нижней метки выключить секундомер. По разности показаний секундомера вычислить время τ (плотность касторового масла – $9,7 \cdot 10^2$ кг/м³, плотность глицерина – $1,26 \cdot 10^3$ кг/м³).

4. Выполнить пункты 1 – 3 несколько раз.

5. Рассчитать по полученным данным среднее значение вязкости жидкости и числа Рейнольдса, вычислить погрешность измерений.

6. Сопоставить полученные результаты и неравенство (3), проверить справедливость применения формулы (2).

Дополнительное задание

Исследовать зависимость скорости движения шарика в жидкости от его диаметра. Предположив степенную зависимость $v \sim r^n$, определить показатель степени n .

Контрольные вопросы

1. Выведите неравенство (3) из условия, что $Re \ll 1000$ и архимедова сила пренебрежимо мала.

2. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости?

3. Чем обусловлено возникновение силы лобового сопротивления в вязкой жидкости: а) при малых скоростях движения шарика; б) при высоких скоростях движения шарика?

4. Почему падение шарика в жидкости сначала ускоренное, затем становится равномерным?

5. Почему верхняя метка должна быть ниже уровня жидкости, а нижняя – выше дна?

Список рекомендуемой литературы

1. Стрелков, С. П. Механика / С. П. Стрелков. – М. : Наука, 1965. – § 112.

2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1979. – § 100, 101.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1977. – § 78.

Лабораторная работа № 2-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ И ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: исследование упругих и тепловых свойств воздуха.

Оборудование: труба с подвижной стенкой на одном из концов, звуковой генератор, электронный осциллограф, термометр.

Введение

Скорость распространения звуковых волн в среде определяется в первую очередь упругими свойствами этой среды. Газы обладают только объемной упругостью. Поэтому в них могут распространяться только продольные волны, в которых чередуются области сгущения и разрежения газа. Скорость звука v в общем случае определяется выражением

$$v = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}, \quad (1)$$

где P – давление в газе; ρ – плотность газа.

Лаплас установил, что в звуковой волне в газе колебания происходят настолько быстро, что теплообмен между областями разрежения и сгущения не имеет места. Распространение звука в газе – адиа-

батический процесс. Уравнение Пуассона для адиабатического процесса:

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad (2)$$

где $\gamma = C_p / C_v$ – показатель адиабаты; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; C_v – теплоемкость при постоянном объеме; V – объем.

Если учесть, что плотность ρ пропорциональна $1/V$, то для дифференциала левой части (2) получается

$$\gamma P d\rho - \rho dP = 0. \quad (3)$$

Отсюда скорость звука в газе

$$v = \sqrt{\gamma P / \rho}. \quad (4)$$

Из уравнения состояния идеального газа в форме

$$P = \frac{\rho RT}{M}, \quad (5)$$

(где M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура) и соотношения (4) следует формула для показателя адиабаты:

$$\gamma = Mv^2 / RT. \quad (6)$$

Формула (6) используется в данной лабораторной работе для определения показателя адиабаты воздуха.

Скорость звука определяется методом стоячей волны. Стоячая волна образуется, например, при наложении двух плоских гармонических волн, бегущих в противоположных направлениях по оси X :

$$h_1 = A_0 \cos(\omega t - kx) \text{ и } h_2 = A_0 \cos(\omega t + kx), \quad (7)$$

где h_1, h_2 – смещение частиц среды в первой волне и во второй волне соответственно; A_0 – амплитуда колебаний; ω – циклическая частота; k – волновое число. Результирующая волна имеет вид

$$h = h_1 + h_2 = 2 A_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos \omega t, \quad (8)$$

где λ – длина звуковой волны.

Это стоячая волна, которая характеризуется, как следует из формулы (8), чередующимися пучностями и узлами. В местах расположения пучностей амплитуда стоячей волны максимальна, в местах расположения узлов амплитуда стоячей волны равна нулю. Расстояние Δx между соседними узлами и между соседними пучностями одинаково и равно

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}. \quad (9)$$

Таким образом, длина звуковой волны может быть найдена по измеренным значениям Δx . Скорость звука v , в свою очередь, можно рассчитать по формуле

$$v = \lambda \nu, \quad (10)$$

где ν – частота звуковой волны. Окончательно для скорости звуковой волны получается выражение

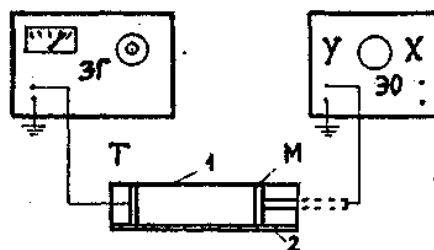
$$v = 2\Delta x \nu, \quad (11)$$

которое и используется в данной лабораторной работе для определения скорости звука в воздухе.

Описание установки

Схема установки представлена на рисунке. Звуковая волна создается в длинной стеклянной трубке 1 с одной подвижной стенкой М. Вдоль трубы расположена линейка 2.

В неподвижной стенке трубы укреплен телефон Т, соединенный со звуковым генератором ЗГ. В подвижной стенке трубы укреплен регистрирующий микрофон, соединенный с входом электронного осциллографа ЭО.



В стеклянной трубке происходит наложение бегущей волны от телефона Т и отраженной волны от подвижной стенки М. Результирующая волна – стоячая.

Порядок выполнения работы

1. Включить звуковой генератор и осциллограф.
2. После прогрева приборов установить на звуковом генераторе частоту волны и необходимую амплитуду сигнала (по указаниям преподавателя).
3. Установить для удобства регистрации необходимую частоту развертки осциллографа. Перемещая подвижную стенку М, убедиться, что на экране осциллографа отчетливо видны максимальный по величине сигнал (пучность) и минимальный сигнал (узел).
4. Измерить координаты всех узлов и пучностей вдоль стеклянной трубки. Измерить температуру воздуха.
5. Вычислить среднее значение $\langle \Delta x \rangle$ расстояния между узлами и пучностями.

6. Вычислить среднее значение скорости звука и среднее значение показателя адиабаты воздуха, используя формулы (6) и (11). Рассчитать погрешности измерения ν и γ .

7. Провести измерения ν и γ на других частотах (по указанию преподавателя), повторяя пункты 3 – 6.

8. Проанализировать полученные результаты.

Дополнительное задание

Исследовать зависимость скорости звука в воздухе от частоты.

Контрольные вопросы

1. Выведите выражение для скорости звука в газе.
2. Почему процесс распространения звуковой волны адиабатический?
3. Как, используя стоячие волны, можно определить скорость звука?
4. Как в данной установке определяются положения узлов и пучностей?
5. Чему равно теоретическое значение показателя адиабаты воздуха, вытекающее из классической теории идеального газа?

Список рекомендуемой литературы

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Механика : в 5 т. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1979. – § 85.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1990. – § 82.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1977. – § 97.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – § 99.

Лабораторная работа № 2-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВОДЫ

Цель работы: ознакомиться с понятием поверхностного натяжения жидкостей и двумя методами измерения коэффициента поверхностного натяжения.

Оборудование: а) торсионные весы, кольцо на подвеске, делительная воронка, стаканчик; б) мерная бюретка с воронкой, сосуд с жидкостью, микроскоп, термометр.

Введение

Широкое распространение наряду с силами тяготения, упругости, трения получили силы поверхностного натяжения. В природе известно три агрегатных состояния: твердое, жидкое, газообразное. Жидкость занимает промежуточное положение между твердым и газообразным состоянием. По мере развития представления о строении вещества было выяснено, что между молекулами вещества одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания. На рис. 1, а приведена качественная зависимость межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами. Силы отталкивания – положительные, а силы взаимного притяжения – отрицательны.

Существует такое расстояние между молекулами r_0 , на котором силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга. Таким образом, расстояние r_0 соответствует равновесному расстоянию между молекулами. При $r > r_0$ преобладают силы притяжения ($F < 0$), а при $r < r_0$ – силы отталкивания ($F > 0$). На расстояниях $r > 10^{-9}$ м межмолекулярные силы практически отсутствуют. Элементарная работа δA силы при изменении расстояния между молекулами на dr совершается за счет взаимной потенциальной энергии молекул:

$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{r} = -d\Pi.$$

На рис. 1, б приведена качественная зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними. Из данной кривой следует, что при $r = r_0$ взаимодействующие молекулы обладают минимальной потенциальной энергией.

Поверхностное натяжение жидкости обусловлено действием молекулярных сил притяжения, быстро убывающих с расстоянием (порядка 10^{-9} м), которое называется радиусом молекулярного действия R , а сфера радиуса R – сферой молекулярного действия.

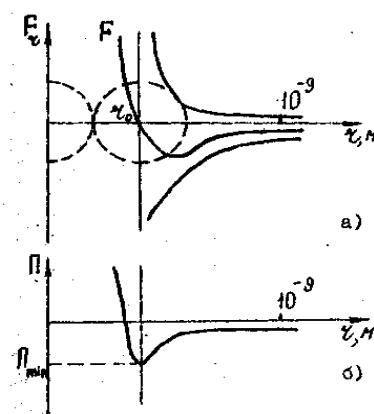


Рис. 1

Рассмотрим выделенную внутри жидкости молекулу A (рис. 2). На расстоянии R на молекулу действуют соседние молекулы, входящие в сферу молекулярного действия.

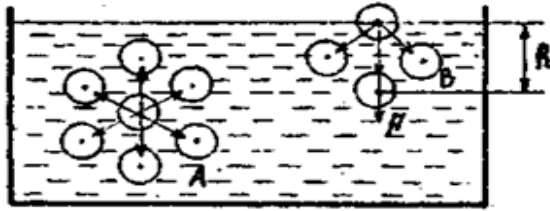


Рис. 2

Силы, с которыми эти молекулы действуют на молекулу A , направлены в разные стороны, поэтому результирующая сила внутри жидкости равна нулю.

Однако в поверхностном слое – молекула B – равновесие нарушается, так как сфера молекулярного действия лишь частично расположена внутри жидкости. На молекулу действует сила притяжения со стороны жидкости и пара. Результирующая сила \vec{F} не равна нулю и направлена внутрь жидкости, потому что концентрация молекул в газе мала по сравнению с концентрацией в жидкости. Этим объясняется происхождение внутреннего давления поверхностного слоя на жидкость и стремление поверхности жидкости уменьшить свою площадь.

Переход молекул из глубины жидкости в ее поверхностный слой возможен только при совершении работы против молекулярных сил. Эта работа совершается за счет кинетической энергии молекул жидкости и приводит к увеличению потенциальной энергии молекул поверхностного слоя. Поэтому молекулы, находящиеся в поверхностном слое, обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости. Эта дополнительная энергия E , которой обладают молекулы в поверхностном слое жидкости, называется поверхностной энергией и пропорциональна площади слоя S :

$$E = \sigma S. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности σ между поверхностной энергией и площадью поверхности называется коэффициентом поверхностного натяжения. Величина его зависит от рода обеих сред, образующих поверхность, и от температуры.

Равновесное состояние жидкости ($r = r_0$) характеризуется минимумом потенциальной энергии, складывающейся из поверхностной и потенциальной энергий в поле тяжести. В связи с этим жидкость при отсутствии внешних сил будет стремиться при заданном объеме сократить свою поверхность до минимума и принять шарообразную форму.

Выделим часть поверхности жидкости, ограниченную замкнутым контуром (рис. 3). Под действием сил поверхностного натяжения поверхность жидкости сокращается, и рассматриваемый контур перемещается в новое положение. Эти силы направлены по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно к участкам контура, на котором они действуют. При перемещении выделенного участка Δl на расстояние Δx под действием силы F поверхностного натяжения совершается работа $F\Delta x$ за счет уменьшения поверхностной энергии ΔE :

$$F\Delta x = -\Delta E,$$

отсюда следует, что сила поверхностного натяжения

$$F = -\Delta E/\Delta x.$$

Так как по формуле (1) $\Delta E = \sigma\Delta S = \sigma\Delta l\Delta x$, то

$$F = -\sigma\Delta l, \quad (2)$$

где знак «минус» указывает на то, что сила направлена в сторону, противоположную смещению Δx . Анализируя полученные формулы (1) и (2), можно установить, что коэффициент поверхностного натяжения σ представляет собой и энергетическую, и силовую характеристики поверхностного натяжения жидкостей: он является поверхностной энергией, которой обладает единичная площадь поверхности, и в то же время является силой поверхностного натяжения, которая действует на контур единичной длины.

А. Метод отрыва кольца

Сущность метода состоит в том, что измеряют силу, которую необходимо приложить, чтобы оторвать от поверхности жидкости смачиваемое тонкое металлическое кольцо. Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения σ представляет собой торсионные весы T (рис. 4), у которых вместо чашечки на крючок коромысла подвешено тонкое металлическое кольцо O . С помощью кронштейна к стойке весов крепится делительная воронка A с краном K , заполнен-

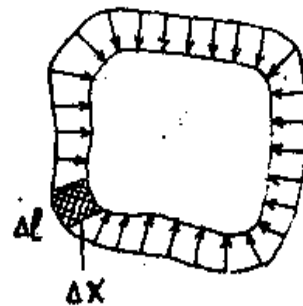


Рис. 3

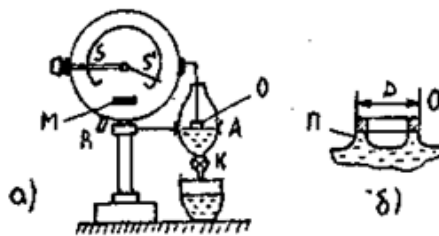


Рис. 4

ная исследуемой жидкостью (водой). Если подвести уровень воды под кольцо так, чтобы оно нижним основанием коснулось поверхности воды, то в результате взаимодействия молекул воды и кольца вода начнет подниматься по стенкам смачиваемого кольца, а само кольцо немного втянется внутрь жидкости. При медленном опускании поверхности воды между кольцом O и поверхностью образуется цилиндрическая пленка Π (см. рис. 4, б). Увеличивающая поверхность жидкости стремится сократиться. Сила поверхностного натяжения, действующая на внешнюю и внутреннюю поверхности пленки, тянет кольцо вниз, закручивая пружину торсионных весов. Сила упругости пружины возрастает с закручиванием пружины по мере понижения уровня воды, и в момент отрыва кольца от поверхности воды будет равна силе F поверхностного натяжения. Разрыв поверхности жидкости происходит по внешней и внутренней окружностям кольца, общая длина которых для тонкого кольца близка к величине $\ell = 2\pi D$, где D – диаметр кольца. Коэффициент поверхностного натяжения найдем по формуле (2):

$$\sigma = F/\ell.$$

Уровень воды в делительной воронке опускают и поднимают с помощью резиновой груши (см. рис. 4) при открытом кране K .

Порядок выполнения работы

1. При арретированной весовой системе (рычаг R арретира отведен влево) установить весы по уровню с помощью винтов так, чтобы пузырек уровня находился в центре кружка.

2. Привести весы к нулевому положению. Для этого повесить на крючок добавочный грузик 100 мг, указательную стрелку поставить на нулевую отметку шкалы, освободить арретир, совместить нулевой штрих подвижной шкалы с положением контрольной стрелки.

3. Отведя рычаг R влево, арретировать весовую систему, снять добавочный грузик в 100 мг.

4. Отведя рычаг вправо, освободить весовую систему, открыть кран K и, слегка нажимая на резиновую грушу, медленно подвести уровень воды под нижнее основание кольца. Контрольная стрелка M должна быть немного правее нулевого штриха подвижной шкалы.

5. Для измерения силы поверхностного натяжения открыть кран настолько, чтобы вода очень медленно убывала из делительной воронки, и когда контрольная стрелка M совместится с нулевым штри-

хом подвижной шкалы, удерживать ее в этом положении, закручивая рычагом S пружину весов. Зафиксировать положение указательной стрелки S' (показание весов F'), при котором кольцо отрывается от поверхности воды. Измерение повторить не менее 10 раз и вычислить среднее значение.

6. Так как оторвавшееся от поверхности воды кольцо остается покрытым пленкой воды, оно будет несколько тяжелее сухого, вес которого соответствовал нулевому положению весов. Поэтому среднее значение силы поверхностного натяжения

$$\langle F \rangle = \langle F' \rangle - \langle f \rangle,$$

где $\langle f \rangle$ – средний вес мокрого кольца. Поскольку вес мокрого кольца мало изменяется при отдельных измерениях, его можно определить один раз в конце измерений. Для этого арретировать весы, повесить на крючок добавочный грузик в 100 мг, освободить весовую систему и зафиксировать показание весов f .

Кольцо из делительной воронки не вынимать!

7. Вычислить среднее значение коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{\langle F' \rangle - \langle f \rangle}{\ell}.$$

Удвоенная длина окружности кольца $\ell = (26,0 \pm 0,4)10^{-3}$ м.

8. Вычислить абсолютную погрешность среднего значения коэффициента поверхностного натяжения.

9. Записать окончательный результат

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta\sigma.$$

Б. Метод отрыва капель

Второй метод определения коэффициента поверхностного натяжения заключается в следующем. При истечении жидкости из узкой трубки при малом расходе образующиеся капли непосредственно перед отрывом висят на шейке (рис. 5), при этом сила тяжести P , действующая на каплю, уравнивается силами поверхностного натяжения, действующими по контуру $\ell = \pi D$, ограничивающему поперечное сечение шейки и ее узкой части (D – диаметр шейки в этом месте). Равно-

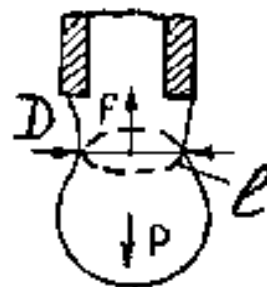


Рис. 5

действующую F сил поверхностного натяжения, действующих по контуру ℓ , можно представить в виде произведения коэффициента поверхностного натяжения σ на длину контура ℓ , т.е.

$$F = \sigma \pi D.$$

Непосредственно перед отрывом капли выполняется соотношение

$$P = F \quad \text{или} \quad mg = \sigma \pi D,$$

где m – масса капли. Пользуясь этим соотношением, можно определить коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = mg / \pi D. \quad (3)$$

Массу одной капли определяют по общей массе n капель. Для этого используют трубку с делениями, имеющую сужение на конце, и кран (бюретку). Бюретка наполняется жидкостью. Если объем жидкости при вытекании из бюретки изменился на величину V и при этом сосчитано число капель n , то масса m одной капли равна массе вытекшей жидкости ρV (где ρ – плотность), деленной на число капель:

$$m = \rho V / n.$$

Подставляя значение m в формулу (3), получим формулу для вычисления коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = \rho V g / \pi D n. \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. Из бюретки каплями выпустить намеченный объем жидкости ($3 - 4 \text{ см}^3$), считая число капель в этом объеме. Кран следует повернуть так, чтобы капли вытекали достаточно медленно и их можно было точно сосчитать. Опыт повторить 5 – 6 раз (при неизменном объеме V вытекающей жидкости).

2. Плотность ρ жидкости в зависимости от температуры найти по таблице справочника.

3. Диаметр D шейки капли перед моментом отрыва определить несколько раз с помощью микроскопа и вычислить среднее значение. Определить погрешность диаметра.

4. Пользуясь средними значениями числа капель n (при взятом объеме V) и диаметра D шейки капли перед отрывом, вычислить среднее значение коэффициента σ поверхностного натяжения по формуле (4) и абсолютную погрешность $\Delta\sigma$.

5. Окончательный результат записать в виде $\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta\sigma$.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит коэффициент поверхностного натяжения и почему $\sigma \rightarrow 0$ при температуре, приближающейся к критическому состоянию?
2. Получите расчетные формулы для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца и методом отрыва капель.
3. Получите формулу абсолютной погрешности определения коэффициента поверхностного натяжения σ .

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – 352 с.
2. Методические указания к лабораторным работам по физике : Молекулярная физика / под ред. Н. Г. Конопасова ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1983. – 52 с.

Лабораторная работа № 2-7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА

Цель работы: ознакомление с методом измерения показателя адиабаты для воздуха при адиабатическом процессе расширения и последующем изохорическом нагревании.

Оборудование: установка, состоящая из стеклянного баллона с кранами, манометра и осушительного фильтра с порошком хлористого кальция, насоса и секундомера.

Введение

Адиабатическим называется такой процесс, который протекает без теплообмена с окружающей средой. Быстропротекающие процессы можно считать адиабатическими, если за время протекания процесса теплообменом рабочего объема с окружающей средой можно пренебречь.

Адиабатический процесс в газе описывается уравнением Пуассона

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma,$$

где P_1, V_1 – первоначальные давление и объем газа; P_2, V_2 – давление и объем газа после адиабатического процесса; γ – показатель адиабаты.

Адиабатический процесс на диаграмме $P - V$ изображается кривой $PV^\gamma = \text{const}$, называемой адиабатой. Показатель адиабаты равен отношению теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}.$$

Теплоемкостью тела называется отношение элементарного количества тепла δQ , полученного телом, к соответствующему приращению dT его температуры:

$$C = \delta Q / dT .$$

Если масса тела равна единице массы, то теплоемкость называют удельной. Теплоемкость одного моля вещества называют молярной. Для газов теплоемкость (как удельная, так и молярная) при постоянном давлении больше теплоемкости при постоянном объеме ($C_P > C_V$), так как при нагревании газа при постоянном давлении (изобарический процесс) подведенное к газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии (а следовательно, и температуры) и на совершение газом работы расширения для поддержания постоянного давления. Например, если газ заключен в сосуд с подвижным поршнем, обеспечивающим постоянное давление, то, нагреваясь, он расширяется и поднимает поршень, совершая, таким образом, работу против внешних сил. При нагревании при постоянном объеме (изохорический процесс) все тепло, подведенное к газу, идет на увеличение только его внутренней энергии.

Описание установки

Экспериментальная установка изображена на рис. 1. В стеклянный тонкостенный сосуд A накачивается насосом воздух до некоторого давления P_1 , превышающего атмосферное: $P_1 = P_0 + h_1$, где P_0 – атмосферное давление; h_1 – избыток давления сверх атмосферного (измеряется водяным манометром M).

Когда воздух в баллоне примет температуру окружающего воздуха T_1 , быстро (≤ 1 с) открывается клапан K , и воздух выпускается наружу до тех пор, пока давление в баллоне не станет равным атмосферному ($P_2 = P_0$).

Выход воздуха происходит быстро, и, пренебрегая в первом приближении передачей тепла через стенки баллона, процесс расширения воздуха в баллоне можно считать адиабатическим. При этом расширяющийся воздух совершает работу против внешних сил – внешнего атмосферного давления.

Следовательно, температура воздуха в баллоне понижена (до температуры T_2).

После закрытия клапана K давление внутри сосуда начнет возрастать, так как охладившийся при расширении воздух снова нагревается, получая тепло из окружающей среды. Возрастание давления прекратится, когда температура воздуха сравняется с внешней температурой T_1 . Окончательное давление

$$P_3 = P_0 + h_2,$$

где h_2 – разность уровней манометра.

Происходящие в сосуде процессы представлены на $P - V$ диаграмме на рис. 2. Температура воздуха в состояниях 1 и 3 одинакова. Согласно закону Бойля – Мариотта

$$V_1(P_0 + h_1) = V_2(P_0 + h_2)$$

или

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_0 + h_2}{P_0 + h_1}. \quad (1)$$

В процессе 1 – 2 произошло адиабатическое расширение газа. Согласно уравнению Пуассона, получим

$$(P_0 + h_1)V_1^\gamma = P_0V_2^\gamma; \quad (2)$$

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \frac{P_0}{P_0 + h_1}.$$

Из (1) и (2) следует

$$\frac{P_0}{P_0 + h_1} = \left[\frac{P_0 + h_2}{P_0 + h_1}\right]^\gamma.$$

Логарифмирование дает

$$\gamma = \frac{\lg P_0 - \lg(P_0 + h_1)}{\lg(P_0 + h_2) - \lg(P_0 + h_1)}.$$

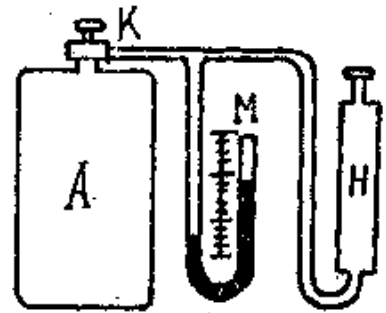


Рис. 1

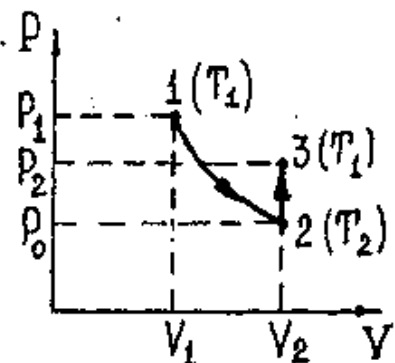


Рис. 2

Так как давления P_0 , P_0+h_1 и P_0+h_2 незначительно отличаются друг от друга, то в первом приближении логарифмы величин можно заменить их величинами, т.е. искомое значение

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (3)$$

Для вычисления γ по формуле (3) нужно измерить добавочные (относительно атмосферного) давления воздуха в баллоне в 1-м и 3-м состояниях.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы убедиться в герметичности кранов и мест соединения трубок. Для этого накачать в сосуд воздух и перекрыть кран K . По манометру проследить за изменением давления h_1 в сосуде с течением времени t и построить график $h_1=f(t)$. Если установка достаточно герметична, то по истечении некоторого времени τ , необходимого для установления термодинамического равновесия, давление в баллоне перестанет снижаться. В противном случае необходимо найти и устранить течь. Из графика рис. 3 определить время установления термодинамического равновесия τ .

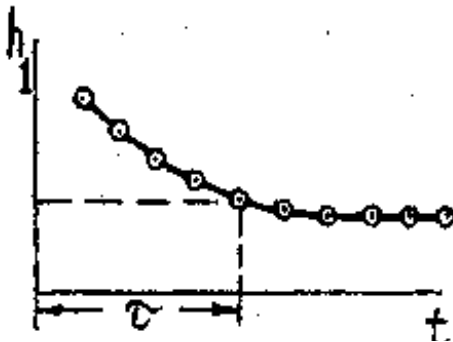


Рис. 3

2. Накачать воздух в сосуд. Выждав время τ , измерить избыточное давление h_1 воздуха в сосуде перед адиабатическим расширением. Затем на короткое время (только до момента выравнивания давлений) открыть кран K (см. рис. 1). Давление в сосуде и температура понизятся (давление до атмосферного, а температура станет ниже комнатной). Температура воздуха в сосуде сравняется с комнатной через время τ , после этого измерить избыточное давление h_2 . Измерения повторить 5 – 10 раз.

Величину γ подсчитать по формуле (3) для каждой пары значений h_1 и h_2 . Результаты отдельных экспериментов будут заметно отличаться друг от друга. Разброс связан с временем открывания крана K : если кран закроем раньше, чем давление упадет до атмосферного, получим завышенные значения h_2 и γ ; если кран закроем с опозданием, получим заниженные значения h_2 и γ . Так как разброс отдельных результатов случаен, вероятным результатом измерения считаем среднее значение.

3. Результаты измерений h_1 и h_2 записать в таблицу. Подсчитать среднее значение γ . Оценить погрешность γ двумя способами: как случайную и как погрешность косвенных измерений. Сравнить их. Окончательный результат представить в виде

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma.$$

Дополнительное задание

Исследовать влияние времени открывания крана K на получаемый результат. Определить оптимальное время открывания крана K и проанализировать полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется адиабатическим, и при каких условиях он протекает?
2. Приведите уравнение Пуассона. Чему равен показатель адиабаты? Что такое теплоемкость?
3. Опишите процессы, протекающие в сосуде при измерениях величин h_1 и h_2 .
4. Как повлияло бы на результат наличие в сосуде паров воды?

Список рекомендуемой литературы

1. Лабораторный практикум по физике / под ред. А. С. Ахматова. – М. : Высш. шк., 1960. – 360 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.

3.6. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. РАЗДЕЛ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

В цикле лабораторных работ по данной тематике исследователь знакомится с характеристиками электрического и магнитного полей и методами исследования этих полей, учится собирать электрические цепи, приобретает навыки работы с электроизмерительными приборами. В работах используются основные законы электромагнетизма.

Порядок оформления отчета о выполнении лабораторной работы в лаборатории электрических и магнитных измерений

Отчет должен содержать задание, спецификацию приборов, таблицу измерений, пример расчета. При обработке результатов делаются все необходимые расчеты искомой величины и погрешностей из-

мерений в соответствии с заданием. Окончательный результат записывается с учетом погрешности. В конце отчета приводится краткий анализ полученного результата.

Спецификация приборов составляется, если в работе используются стрелочные приборы или имеются паспорта этих приборов, и записывается в виде таблицы:







№ п/п	Наименование измерительного прибора	Заводской номер	Система прибора	Пределы измерений	Цена деления	Класс точности прибора	Абсолютная погрешность

Сведения о свойствах стрелочного прибора содержатся на его панели.

Наименование прибора может быть написано либо словом, либо символом, например V – вольтметр, mA – миллиамперметр.

Система прибора задается значком (таблица).

Значки систем приборов

Система	Значок
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Электродинамическая с магнитным экраном	
Индукционная	
Электростатическая	

Пределы измерений задаются на панели прибора:

а) если несколько клемм подключения прибора – то цифрой, обозначенной рядом с клеммой;

б) если две клеммы подключения и переключатель пределов – то цифрой, обозначенной на переключателе.

Цена деления определяется отношением предела измерения к числу делений шкалы.

Класс точности обозначен на панели прибора в виде цифры, которая может иметь следующие значения: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Абсолютная погрешность вычисляется по формуле $\Delta A = \frac{k \cdot A_n}{100}$, где k – класс точности, A_n – номинальное значение измеряемой величины (предел измерений).

Лабораторная работа № 3-1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: ознакомиться с методом моделирования электрического поля, построить эквипотенциальные поверхности (линии) электростатического поля, силовые линии поля.

Оборудование: ванна, заполненная малопроводящей жидкостью; набор электродов; нуль-индикатор, в качестве которого может использоваться головной телефон, осциллограф или вольтметр для измерения в цепи переменного тока; источник переменного тока малого напряжения, в качестве которого можно использовать звуковой генератор.

Введение

Электрическим полем называется особая форма материи в пространстве около электрических зарядов, в которой действуют электрические силы. Если заряды неподвижны и неизменны, их поле называется электростатическим. Электростатическое поле в каждой его точке характеризуется вектором напряженности электрического поля \vec{E} (силовая характеристика); потенциалом этой точки φ (энергетическая характеристика поля в данной точке).

Напряженность поля, силовые линии. Напряженность электрического поля \vec{E} – векторная характеристика электрического поля, чис-

ленно равна силе, действующей в данной точке поля на единичный положительный электрический заряд; вектор напряженности по направлению совпадает с направлением этой силы:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Если электрическое поле вызвано одним точечным зарядом q , то величина напряженности поля определяется как $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$.

Для графического изображения поля проводят линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности поля. Такие линии называются *силовыми линиями поля*.

Потенциал данной точки электростатического поля определяется как физическая величина, численно равная работе, совершаемой электрическими силами при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность, или как физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в эту точку:

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q} = \frac{W}{q}.$$

Работа сил потенциального поля по замкнутому контуру равна нулю. Потенциал поля точечного заряда определяется как $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$.

Эквипотенциальная поверхность – геометрическое место точек, потенциалы которых равны (в случае двух измерений говорят об *эквипотенциальной линии*). Согласно формуле для потенциала электростатического поля точечного заряда эквипотенциальные поверхности являются сферическими. Силовые линии и эквипотенциальные линии взаимно ортогональны (т.е. касательные, проведенные в точках их пересечения, взаимно перпендикулярны). На рис. 1 сплошными линиями изображены эквипотенциальные, а пунктирными – силовые линии электрического поля двух одноименных точечных зарядов.

Значение модуля вектора напряженности можно определить, измеряя разность потенциалов в двух близко расположенных точках, лежащих на силовой линии, построенной по координатной сетке.

Известно, что

$$\vec{E} = -grad\varphi \text{ или } \vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi, \quad (2)$$

где

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{e}_x + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{e}_y + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{e}_z \quad \text{—} \quad (3)$$

градиент потенциала φ – вектор, указывающий направление быстрого увеличения величины φ .

Метод моделирования электростатического поля. Для экспериментального изучения электростатического поля используется полная аналогия, существующая между распределением потенциала в электростатическом поле и в проводящей среде, по которой течет стационарный (постоянный во времени) электрический ток. Такая среда условно обозначается "поле тока".

Аналогия дает возможность заменять изучение электростатического поля между заряженными телами излучением поля стационарного тока между электродами при условии, что их потенциалы поддерживаются постоянными и проводящая среда имеет значительно большее удельное сопротивление, чем материал электродов. Такой метод называется моделированием электростатического поля.

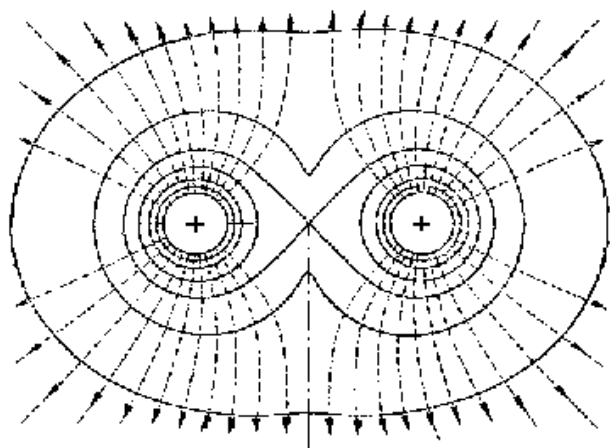


Рис. 1

Для изучения поля в проводящую среду вводятся два подвижных зонда и два неподвижных электрода; каждый зонд принимает потенциал той точки, в которую он введен.

Отсутствие разности потенциалов между зондами свидетельствует о том, что они находятся на одной эквипотенциальной поверхности. Координаты точек с одинаковыми потенциалами регистрируются в процессе исследования электрического поля; по ним строятся эквипотенциальные линии и силовые линии.

Описание установки

Электрическое поле моделируется при помощи электролитической ванны. Она представляет собой сосуд (желательно с плоским дном), в котором находится слабопроводящая среда. В качестве проводящей

среды пользуются сильно разбавленным электролитом, который нали-
вается в сосуд тонким слоем. На дно сосуда нанесена координатная
сетка; в сосуд помещаются электроды, которые представляют исследуе-
мую систему заряженных тел. Чтобы поддерживать потенциалы элект-
родов постоянными, они присоединяются к источнику питания. Необ-
ходимо использовать источник переменного тока, поскольку на постоян-
ном токе у поверхности электродов образуется двойной электрический
слой, который не позволяет осуществить физическое моделирование.

Следует строго соблюдать горизонтальное положение ванны, что-
бы слой электролита имел повсюду одинаковую толщину. Для предот-
вращения нагрева электролита рекомендуется работать с малой плот-
ностью тока, поэтому электроды присоединяются к источнику неболь-
шого напряжения (~ 10 В).

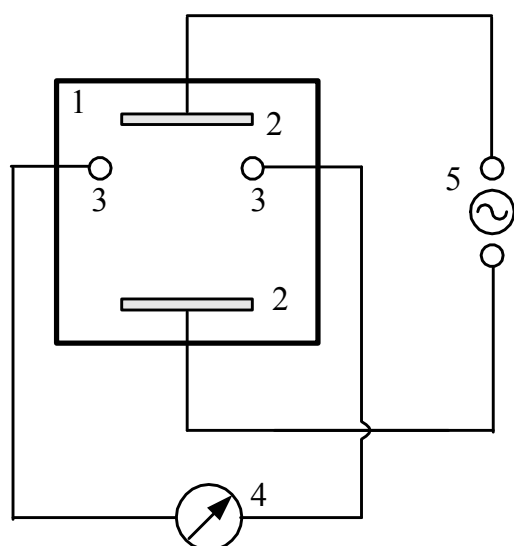


Рис. 2

На рис. 2 изображена схема
установки, где 1 – электролитическая
ванна, 2 – электроды, 3 – зонды, 4 –
индикатор, 5 – источник тока.

Чтобы предотвратить искаже-
ния поля, сопротивление индикатора
должно быть значительно больше
сопротивления участка среды между
зондами, поэтому удобно в качестве
индикатора использовать электрон-
ный осциллограф. В качестве зондов
используются металлические тела ма-
лого размера.

Порядок выполнения работы

1. Расположить электроды в электролитической ванне по реко-
мендации преподавателя (рис. 3). Записать их координаты. Подклю-
чить электроды к источнику переменного тока.

2. Соединительными проводами подключить зонды к нуль-
индикатору (осциллографу или вольтметру).

3. Зафиксировать один из зондов (неподвижный) в произволь-
ной точке ванны, записать координаты этой точки. Перемещая второй
зонд (подвижный), определить положение другой точки, для которой
сигнал на индикаторе становится равным нулю. В этом случае зонды

находятся в точках поля с одинаковым значением потенциала. При использовании осциллографа в качестве индикатора сигнал должен быть минимальным по амплитуде. Записать координаты найденной точки.

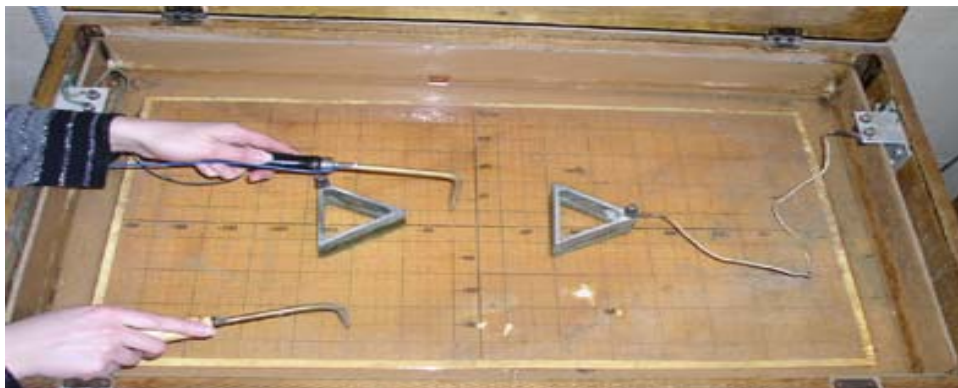


Рис. 3

4. Не меняя положение неподвижного зонда и используя методику п. 3, определить координаты еще 7 – 10 точек поля.
5. Результаты этой серии исследований занести в таблицу:

Координаты зонда	X , мм	Y , мм
Неподвижного		
Подвижного		

6. Провести другую серию экспериментов. Для этого зафиксировать неподвижный зонд в иной точке ванны и вновь проделать измерения по методике, изложенной выше. Результаты занести в таблицу.
7. Опыты проделать для 5 – 7 серий экспериментов.
8. Построить графики. Для этого на листе миллиметровой бумаги в выбранном масштабе указать конфигурацию электродов и обозначить точки равного потенциала из одной серии экспериментов. Изобразить эквипотенциальную линию, соединяя точки равного потенциала плавной линией. Изобразить эквипотенциальные линии для каждой серии экспериментов.
9. Результаты построений использовать для изображения на графике нескольких силовых линий (5 – 7).

Правила работы с генератором звуковых частот

1. Установить ручку регулятора выхода в среднее положение (ручку вращать без приложения усилий).
2. При помощи ручек «множитель» и «частота» установить частоту колебаний в интервале 1000 – 1400 Гц.
3. Включить генератор.
4. Переключатели «ослабление» или «аттенюатор» поставить в положение, при котором уровень выходного сигнала соответствует нормальной работе нуль-индикатора.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение напряженности и потенциала электростатического поля.
2. Запишите формулы напряженности и потенциала поля точечного заряда.
3. Чему равна потенциальная энергия положительного единичного заряда в поле, создаваемом точечным зарядом?
4. Покажите, что силовые линии напряженности электростатического поля ортогональны эквипотенциальным поверхностям.
5. Как математически связаны потенциал и напряженность поля?
6. Какое поле называется потенциальным?
7. Какие поверхности (линии) называются эквипотенциальными?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – 496 с.
2. Физический практикум. Электричество и оптика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1968. – Задача 65.
3. Яворский, Б. М. Курс физики: в 3 т. Т. 2 / Б. М. Яворский. – М. : Наука, 1966. – §21 – 23.

Лабораторная работа № 3-3

МОСТОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: ознакомление с классическим методом измерения сопротивления при помощи мостовой схемы.

Оборудование: измеряемые сопротивления, магазины сопротивлений, гальванометр или микроамперметр, источник постоянного тока, мост постоянного тока Р-333.

Введение

Мостовой метод измерений – метод измерения электрических сопротивлений по постоянному или переменному току при помощи измерительных мостов – нашел широкое применение в измерениях физических величин, функционально связанных с электрическим сопротивлением. На изменении параметров электрических цепей (сопротивления, емкости, индуктивности и др.) под влиянием различных физических факторов основано применение мостового метода для измерения неэлектрических величин (давления, температуры, влажности и т.д.).

Мостовой метод измерения электрических величин, как и компенсационный метод, при использовании эталонов электрических величин позволяет получить результат измерения с точностью, превышающей точность современных методов прямых измерений с цифровой индикацией результата.

Измерение сопротивлений. Метод и описание установки

Мостовая схема (мост Уитстона) состоит из четырех сопротивлений, соединенных последовательно; начало первого сопротивления соединено с концом четвертого; в диагонали образовавшегося замкнутого четырехугольника включены источник тока и индикатор (рис. 1). В одно плечо моста включается измеряемое сопротивление R_x , в другое – образцовое сопротивление R_3 ; два остальных вспомогательных образуют так называемые плечи отношения. В качестве индикатора обычно применяется гальванометр магнитоэлектрической системы с нулем в середине шкалы.

При изменении сопротивления одного из плеч моста, например R_1 , будет изменяться сила тока в цепях моста (I_1, I_2, I_3, I_x).

Существует определенное соотношение между сопротивлениями, составляющими схему R_x, R_1, R_2, R_3 , при котором сила тока, идущего через гальванометр, обращается в нуль. Такое состояние схемы соответствует уравновешенному мосту. Решая систему уравнений Кирхго-

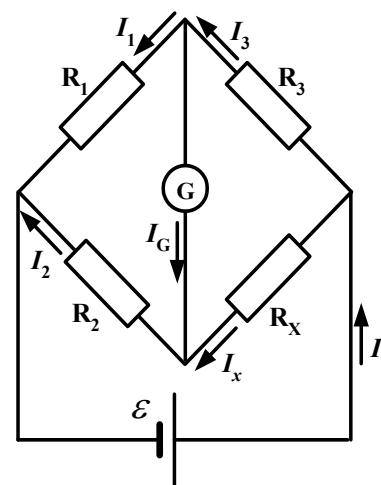


Рис. 1

фа с $\sum I_i = 0$ – для узла, $\sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i$ – для замкнутого контура для уравновешенного моста можно получить соотношение:

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1},$$

откуда $R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}$.

Приведенное выражение может служить для отыскания любого из четырех сопротивлений, включенных в плечи моста, если известны три других сопротивления.

ЭДС батареи, питающей мост, сопротивление батареи и гальванометра существенной роли для определения искомого сопротивления не играют. Однако точность определения неизвестного сопротивления будет выше, когда отношение R_2/R_1 или R_3/R_1 близко к единице.

Мост постоянного тока типа Р-333 – пример технического оформления прибора промышленного изготовления для измерения сопротивления.

Схема моста. Измерительная часть схемы моста – четырехплечий мост, в сравнительном плече которого включен четырехдекадный плавно-регулируемый магазин сопротивлений на 9999 Ом ступенями через 1 Ом. Схема позволяет получать в каждой декаде девять номинальных значений сопротивлений. При помощи переключателя плеч включаются различные комбинации сопротивлений R_1, R_2, R_3 . Общий вид установки показан на рис. 2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 1. В качестве сопротивлений $R_1,$



Рис. 2

R_2, R_3 использовать магазины сопротивлений.

2. После проверки схемы преподавателем схему подключить к источнику тока.

3. Сопротивлениями R_1 и R_2 установить отношения $R_2/R_1 : 1:1, 1:2, 2:1, 3:2$ и т.д. (рекомендуется преподавателем).

4. Подобрать сопротивление R_3 таким образом, чтобы стрелка гальванометра была на нуле.

5. Вычислить неизвестное сопротивление по приведенной ранее формуле.

6. Полученные данные занести в таблицу.

№ п/п	R_1 , Ом	R_2 , Ом	$n = R_2/R_1$	R_3 , Ом	R_x , Ом

7. Повторить аналогичные измерения для отношения R_3/R_1 : 1:1, 1:2, 2:1, 3:2 и т.д. (рекомендуется преподавателем).

8. Рассчитать погрешность R_x .

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Изменится ли условие равновесия моста, если гальванометр и источник тока поменять местами?
3. Как формулируются законы Кирхгофа?
4. Выведите условие равновесия моста, используя законы Кирхгофа.
5. Запишите формулу для определения сопротивления участка цепи, содержащего последовательно или параллельно соединенные резисторы.

Список рекомендуемой литературы

1. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – § 57 – 60.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – § 31, 34, 36.
3. Физический практикум. Электричество и оптика / под ред. В. И. Ивероной. – М. : Наука, 1968. – Задача 69.

Лабораторная работа № 3-8

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА

Цель работы: освоить методы измерения электрического сопротивления металла, определить удельное сопротивление.

Оборудование: прибор ФРМ-01 для измерения удельного сопротивления, содержащий источник регулируемого постоянного напряжения; миллиамперметр с внутренним сопротивлением $R_A = 0,15$ Ом; вольтметр с внутренним сопротивлением $R_V = 2500$ Ом. Прибор оснащен стойкой, к неподвижным и непроводящим кронштейнам которой крепится резистивный провод из хромоникелевого сплава (78 % Ni, 22 % Cr). Между кронштейнами расположено подвижное электрическое контактное устройство, с помощью которого можно изменять сопротивление R , изменяя длину рабочего (нижнего от скользящего контакта) участка провода. Для измерения диаметра провода применяется микрометр.

Введение

Электропроводность металлов обусловлена тем, что в них содержится огромное количество свободных носителей заряда – электронов проводимости, образовавшихся из валентных электронов атомов металла. Электроны проводимости являются коллективизированными (обобществленными).

В классической электронной теории электропроводности металлов эти электроны рассматривают как идеальный электронный газ. При этом пренебрегают взаимодействием электронов между собой, считая, что они соударяются лишь с ионами, образующими кристаллическую решетку. В промежутках между соударениями электроны движутся свободно, пробегая в среднем путь $\langle \lambda \rangle$. Средняя скорость электронов определяется по формуле

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

где m – масса электрона, T – температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (постоянная Больцмана).

Число электронов проводимости в единице объема одновалентного металла может быть определено по формуле

$$n = \delta \frac{N_A}{M},$$

где δ – плотность металла; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ (постоянная Авогадро); M – молекулярная масса металла.

Электрический ток возникает при наличии электрического поля внутри металла, которое вызывает упорядоченное движение электронов с некоторой скоростью $\langle \vec{u} \rangle$. Ток можно охарактеризовать с помощью вектора плотности тока \vec{j} , который численно равен электрическому заряду, проходящему за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению упорядоченного движения заряженных частиц:

$$j = \frac{1}{dS} \frac{dq}{dt} = \frac{dI}{dS}.$$

При равномерном распределении плотности электрического тока j по сечению S проводника

$$j = \frac{I}{S}.$$

Плотность тока связана с концентрацией электронов n , зарядом электрона e и скоростью направленного движения $\langle \vec{u} \rangle$ соотношением

$$\vec{j} = en\langle \vec{u} \rangle. \quad (1)$$

На основании классической электронной теории электропроводности металлов формула (1) может быть преобразована в

$$\vec{j} = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle v \rangle} \vec{E}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что плотность тока \vec{j} пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} . Соотношение (2) выражает закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (3)$$

где σ – удельная электропроводность металла, определяемая выражением

$$\sigma = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle v \rangle}.$$

Величина

$$\rho = 1/\sigma$$

называется удельным сопротивлением материала. Тогда формулу (3) можно записать в виде

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}.$$

Если бы электроны не сталкивались с ионами решетки, длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ и, следовательно, проводимость σ были бы очень большими, а удельное сопротивление ρ – пренебрежимо малым. Таким образом, согласно классическим представлениям электрическое сопротивление металлов обусловлено соударениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки. Несмотря на весьма приближенные допущения, классическая электронная теория металлов качественно объясняет многие законы постоянного тока. Экспериментально удельное сопротивление ρ металла может быть получено при измерении сопротивления R образцов исследуемого материала:

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

где l – длина; S – площадь поперечного сечения образца металла.

Методы измерения сопротивления

1. Метод с использованием амперметра и вольтметра, когда искомое сопротивление рассчитывают по закону Ома для участка цепи (рис. 1):

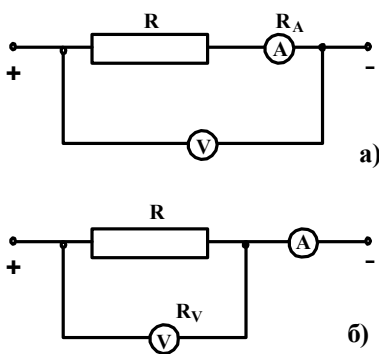


Рис. 1

$$R = U/I,$$

где I – ток в сопротивлении; U – напряжение на нем; R – сопротивление одного из участков резистивной проволоки.

Применение этой формулы предполагает, что внутреннее сопротивление амперметра $R_A = 0$, а внутреннее сопротивление вольтметра $R_V = \infty$. В реальных условиях приходится вводить поправки на внутреннее сопротивление измерительных приборов. Когда измерения происходят по схеме, изображенной на рис. 1, а, амперметр измеряет силу тока в исследуемом сопротивлении, а вольтметр измеряет падение напряжения на сопротивлениях R и R_A . Такая схема включения трактуется как «точное измерение силы тока». В этом случае искомое сопротивление найдется по формуле

$$R = \frac{U}{I} \left(1 - R_A \frac{I}{U}\right), \quad (5)$$

где I , U – измеряются; R_A берется из паспортных данных амперметра.

Когда измерения происходят по схеме, изображенной на рис. 1, б, амперметр измеряет силу тока в параллельной цепи сопротивления R и вольтметра, а вольтметр измеряет падение напряжения только на исследуемом сопротивлении. Такая схема включения трактуется как «точное измерение напряжения». В этом случае искомое сопротивление найдется по формуле

$$R = \frac{R_V U}{IR_V - U}, \quad (6)$$

где I , U – измеряются; R_V берется из паспортных данных вольтметра.

2. Мостовой метод измерения сопротивления основан на балансировке четырехплечного моста (см. описание лабораторной работы 3-3), в одно плечо которого введен измеряемый участок резистивного провода, или моста постоянного тока Р-333 с подключенным измеряемым сопротивлением.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерить неизвестное сопротивление методом амперметра и вольтметра.

1. Включить прибор (рис. 2) в сеть.

2. Установить метод измерения сопротивления. В нажатом положении переключателя реализуется метод амперметра и вольтметра.



Рис. 2

3. Подвижный электрический контакт фиксируют на разных точках резистивного провода. Для каждой точки измеряют длину l исследуемого участка провода, а также несколько раз силу тока I и

напряжение U в электрической цепи по каждой измерительной схеме: а) «точное измерение напряжения»; б) «точное измерение силы тока».

Для каждого опыта рассчитывают величину сопротивления R с учетом поправок на внутреннее сопротивление измерительных приборов:

- для схемы п. 3, а по формуле (6);
- для схемы п. 3, б по формуле (5).

Задание 2. Определить удельное сопротивление металла.

1. Измерить диаметр провода d и площадь сечения S .
2. Из формулы (4) рассчитать удельное сопротивление ρ . Результаты занести в таблицу.
3. Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерений.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные положения классической электронной теории металлов?
2. Запишите формулу для определения плотности тока.
3. Запишите закон Ома в дифференциальной форме.
4. Выведите закон Ома из электронных представлений.
5. В чем сущность электросопротивления металлов?
6. От каких параметров зависит сопротивление проводников?
7. Выведите расчетные формулы (5) и (6).

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – § 34, 77, 78.
2. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – § 145 – 147.

3.7. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. РАЗДЕЛ «КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

Лабораторная работа № 4-2

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ ПО ЕЕ РЕАКТИВНОМУ И АКТИВНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЯМ

Цель работы: ознакомиться с явлением самоиндукции, изучить один из методов определения индуктивности катушки.

Оборудование: исследуемая катушка, ферромагнитный сердечник, вольтметр, амперметр, реостат, трансформатор, мост переменного тока Р-577, мост постоянного тока Р-333.

Введение

В трехтомном труде Майкла Фарадея (1791 – 1867) "Экспериментальные исследования по электричеству" содержится глава об индуктивном влиянии электрического тока на самого себя и индуктивном действии электрических токов вообще. В ней Фарадей описал явление самоиндукции, которое заключается в том, что если в проводящем контуре изменяется сила тока, то в нем возникает ЭДС самоиндукции ε_{si} , пропорциональная скорости изменения тока:

$$\varepsilon_{si} = -L(dI / dt).$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью проводящего контура.

Явление электромагнитной индукции было независимо открыто также американским физиком Джозефом Генри (1797 – 1878). Современная физика увековечила научный вклад Генри, присвоив единице индуктивности L название "генри" (Гн): $1 \text{ Гн} = 1(\text{В} \cdot \text{с}) / \text{А}$.

Индуктивность проводящего контура зависит от его формы и размеров, а также от магнитной проницаемости μ окружающей среды.

В качестве проводящего контура, индуктивность которого будем определять, используем катушку (соленоид). Соленоиды широко применяются в технических устройствах и лабораторной практике, так как с их помощью легко создавать однородное магнитное поле известной напряженности \vec{H} или магнитной индукции \vec{B} . Эти характеристики поля связаны соотношением $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$. Катушки индуктивности также применяются для накопления энергии.

Индуктивность L длинного соленоида вычисляется по формуле

$$L = \mu\mu_0 N^2 S / l = \mu\mu_0 n^2 V,$$

где μ – магнитная проницаемость вещества внутри соленоида; μ_0 – магнитная постоянная; N – число витков соленоида; l – длина соленоида; S – площадь поперечного сечения; $n = N/l$ – число витков на единицу длины; V – объем соленоида.

Для экспериментального определения индуктивности катушки пользуются законом Ома для переменного тока $I = U/Z$, где I и U – эффективные значения силы тока и напряжения на участке цепи, показываемые приборами, предназначенными для переменного тока; Z – общее сопротивление участка цепи переменному току.

Общее сопротивление участка цепи с последовательным соединением R , L и C по переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2},$$

где ω – циклическая частота переменного тока; C – емкость; L – индуктивность; R – омическое (активное) сопротивление участка цепи. Если в исследуемой электрической цепи содержатся R , L и нет емкости C , то общее сопротивление такой цепи вычисляется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Из данной формулы индуктивность катушки

$$L = \sqrt{(Z^2 - R^2)} / \omega,$$

где $\omega = 2\pi\nu$; $\nu = 50$ Гц.

Описание установки

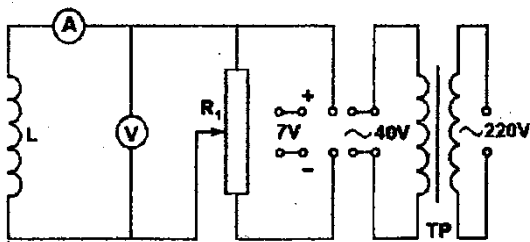


Рис. 1

Экспериментальная установка собирается по схеме (рис. 1). Реостат подключается к источнику тока по схеме потенциометра, чем обеспечивается регулирование напряжения на исследуемой катушке индуктивности L . При подключении катушки индуктивности L к источнику постоянного тока, а это необходимо для определения активного сопротивления катушки, в измерительной части схемы используется вольтметр с малым предельным значением измеряемого напряжения. Мост постоянного тока Р-333 предназначен для прямого измерения



Рис. 2

сопротивления катушки R , а мост переменного тока Р-577 – для прямого измерения сопротивления R катушки или ее индуктивности L (без сердечника). Общий вид установки изображен на рис. 2.

сопротивления катушки R , а мост переменного тока Р-577 – для прямого измерения сопротивления R катушки или ее индуктивности L (без сердечника). Общий вид установки изображен на рис. 2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь экспериментальной установки по схеме, изображенной на рис. 1.

2. Присоединить электрическую цепь к выходным клеммам разделительного трансформатора ТР. После проверки схемы преподавателем разделительный трансформатор включить в сеть $U = 220 \text{ В}$, $\nu = 50 \text{ Гц}$.

3. Меняя положение движка реостата, наблюдать изменение силы тока I и напряжения U , а затем измерить ряд значений силы тока и соответствующие им значения напряжения. Результаты эксперимента внести в таблицу измерений I и U .

4. Ввести в катушку индуктивности ферромагнитный сердечник. Измерить ряд значений силы тока I и соответствующие им значения напряжения U . Результаты измерений занести в таблицу.

5. Выключить трансформатор. Отсоединить электрическую схему от трансформатора и подключить ее к клеммам источника постоянного тока. Заменить вольтметр на другой с малым пределом измерения U .

6. Включить источник постоянного тока. Измерить ряд значений силы тока I и напряжений U . Результаты измерений занести в таблицу.

7. Используя закон Ома, вычислить полное Z и активное R сопротивления катушки.

8. Вычислить индуктивность катушки с сердечником и без сердечника. Оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление самоиндукции? Как вычисляется ЭДС самоиндукции?

2. Как вычисляется индуктивность длинного соленоида?

3. Что такое полное сопротивление проводящего контура и от каких параметров оно зависит?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – § 64, 92.

2. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – § 93.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: изучить устройство, работу электронного осциллографа и генератора звуковой частоты и их применение для исследования электрических колебаний звуковой частоты.

Оборудование: электронный осциллограф, звуковые генераторы известной и неизвестной частот, соединительные провода.

Введение

Электронный осциллограф – электроизмерительный прибор, предназначенный для наблюдения и исследования электрических процессов. Он позволяет исследовать форму кривых, описывающих процесс, сравнивать амплитуду и частоту различных сигналов и т.д. Применяя специальные преобразователи, с помощью осциллографа можно также исследовать быстрые неэлектрические процессы, например механические колебания.

В настоящей работе с помощью осциллографа исследуются процессы сложения колебаний одного направления и сложения взаимно перпендикулярных колебаний. В качестве источников колеба-

ний применяются стандартный генератор звуковой частоты (ГЗ), с помощью которого можно получить колебания в широком диапазоне частот, и генератор ГХ, частота которого постоянна.

Электронно-лучевая трубка – основной элемент электронного осциллографа (рис. 1). Ее элементы: 1 – оксидный катод; 2 – электрод, управляющий яркостью изображения, наложением больших или меньших отрицательных напряжений по отношению к катоду; 3 –

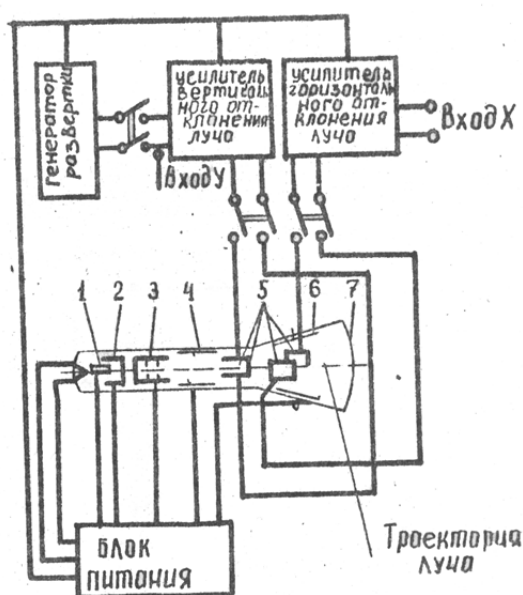


Рис. 1

фокусирующий катод (первый анод), выделяющий узкий электронный пучок; 4 – ускоряющий анод (второй анод), от потенциала кото-

рого зависит чувствительность трубки; 5 – две пары вертикально и горизонтально отклоняющих пластин; 6 – ускоритель (третий анод), усиливающий яркость изображения и представляющий собой проводящий слой на боковой поверхности экрана; 7 – экран с флюоресцирующим слоем (попадая на этот слой, электроны вызывают свечение в точке удара).

Генератор развертки. Для получения на экране трубки картины электрического процесса в координатах "напряжение – время" к одной паре пластин подводится линейно меняющееся со временем (пилообразное) напряжение (рис. 2). Электронный луч под действием пилообразного напряжения прочерчивает горизонтальную линию, пробегая за равные отрезки времени равные расстояния. В течение некоторого времени луч возвращается в исходное положение (обратный ход).

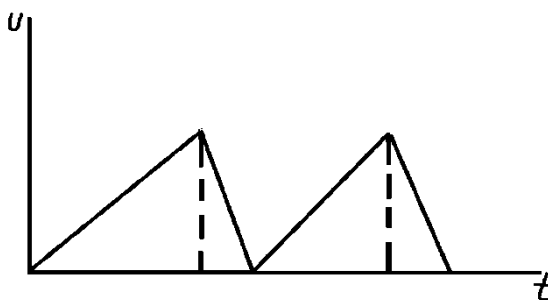


Рис. 2

Наклон пилообразного напряжения и, следовательно, скорость движения луча можно изменять. При этом будет меняться временной масштаб развертки.

Определение частоты сигналов методом фигур Лиссажу. Если подключить к горизонтальному входу осциллографа источник переменного (синусоидального) тока, то светящаяся точка будет совершать гармоническое колебание вдоль оси X : $x = a \sin \omega_x t$. При подключении к вертикальному входу осциллографа источника синусоидального колебания светящаяся точка совершает колебание вдоль оси Y : $y = b \cos(\omega_y t + \alpha)$, где a и b – амплитуды соответствующих смещений; ω_x и ω_y – циклические частоты колебаний вдоль осей X и Y ; α – разность фаз колебаний. Траектория движения точки – результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний. Если частоты взаимно перпендикулярных колебаний неодинаковы, то траектории результирующего движения имеют вид довольно сложных кривых.

Если отношение частот ω_x / ω_y выражается рациональной дробью, то результирующее движение имеет форму кривой, называемой фигурой Лиссажу. Их вид зависит от соотношения амплитуд, частот и

фазы α складываемых взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу вписываются в прямоугольник, центр которого совпадает с нулевым положением луча, а стороны параллельны осям X и Y . В качестве примера для нескольких значений ω_x/ω_y и разности фаз α фигуры Лиссажу приведены на рис. 3. Чем ближе к единице рациональная дробь, выражающая отношение частот колебаний, тем сложнее фигура Лиссажу.

Порядок выполнения работы

1. Специальным кабелем или соединительными проводами подключить осциллограф к генератору.
2. Включив осциллограф и звуковой генератор, получить устойчивую картину сигнала.
3. Изменяя частоту сигнала звукового генератора получить и зарисовать фигуры Лиссажу для соотношения частот 3:2; 2:1; 1:2; 2:3; 3:1.

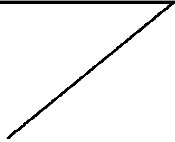
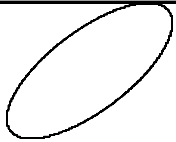
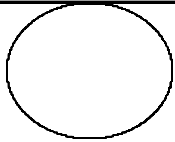
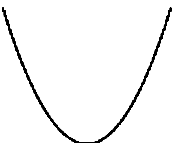
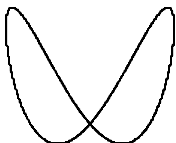
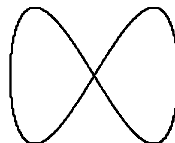
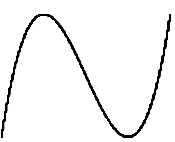
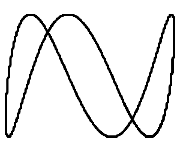
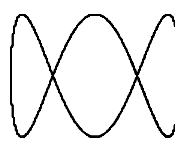
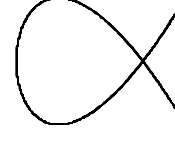
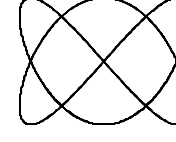
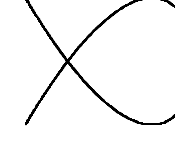
ω_x/ω_y	Сдвиг фаз α		
	0	$\pi/4$	$\pi/2$
$1/1$			
$1/2$			
$1/3$			
$2/3$			

Рис. 3

4. Определить для каждого случая частоту колебаний неизвестного генератора, используя формулу $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{n_y}{n_x}$, где n_x и n_y – число точек касания фигуры соответственно с горизонтальной и вертикальной линиями.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение осциллографа?
2. Из каких основных блоков состоит осциллограф? Каково их назначение?
3. Как устроена электронно-лучевая трубка? Каким образом в ней формируется электронный луч?
4. Что получается в результате сложения двух колебаний одинакового направления и при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний?
5. Как с помощью осциллографа определяется истинное значение амплитуды измеряемого сигнала?

Список рекомендуемой литературы

1. Бутковский, О. Я. Лабораторный практикум по физике. Электростатика и постоянный ток / О. Я. Бутковский, О. Д. Бухарова, А. А. Кузнецов ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1993. – 44 с.
2. Лабораторный практикум. Колебания и волны : учеб. пособие / под ред. В. А. Шилова. – М. : МИФИ, 1989. – 56 с.

Лабораторная работа № 4-7

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Цель работы: получение стоячих электромагнитных волн, определение длины электромагнитной волны и скорости ее распространения.

Оборудование: ламповый генератор незатухающих электрических колебаний, источник питания, двухпроводная измерительная линия с индуктивной связью, два мостика с индикаторами.

Введение

При прохождении электрического тока через контур, обладающий омическим сопротивлением R , часть энергии тока непрерывно переходит в тепло. Поэтому электрические колебания в контуре сравнительно быстро затухают. Для получения незатухающих электрических колебаний электрическую энергию контура необходимо непрерывно пополнять.

Современные генераторы позволяют получить электрические колебания как очень низких, так и очень высоких частот.

Электрические волны вдоль проводов. Двухпроводная линия состоит из двух длинных параллельных проводов, натянутых на некотором расстоянии друг от друга. В дальнейшем будем пренебрегать сопротивлением проводов, а также будем считать, что расстояние между проводами значительно меньше, а длина проводов значительно больше длины электромагнитной волны. При этих условиях электромагнитное поле сосредоточено в основном между проводами, поэтому система практически не излучает электромагнитные волны в окружающее пространство, выполняя роль канала для передачи высокочастотной энергии от генератора к приемнику. Поместим вблизи катушки L лампового генератора незатухающих электрических колебаний катушку L_3 , концы которой присоединим к длинным параллельным проводникам АВ и БГ (рис. 1). При прохождении через контур

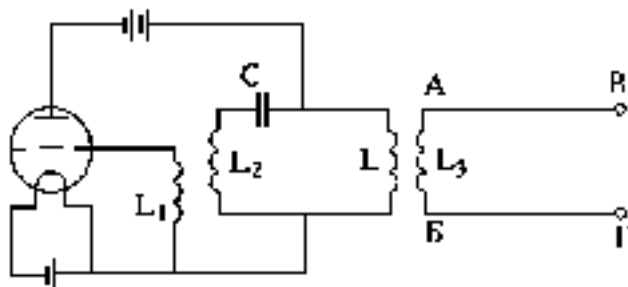


Рис. 1

электрических колебаний в катушке L_3 возникает переменная ЭДС индукции и точки А и Б заряжаются периодически то положительно, то отрицательно, причем если точка А заряжается положительно, то точка Б – отрицательно, и наоборот. В соот-

ветствии с колебательным характером изменения ЭДС в катушке L_3 величина потенциала в точках А и Б меняется колебательным образом. Области с максимальным значением потенциала не остаются локализованными в точках А и Б, а распространяются с некоторой скоростью C , подобно тому, как механические колебания, возбужденные на конце струны, распространяются вдоль этой струны.

Если заснять мгновенную картину распределения потенциала на проводниках АВ и БГ, то окажется, что распределение потенциала проводника меняется по тому же гармоническому закону, по которому совершаются электрические колебания в контуре генератора (рис. 2).

Колебания генератора вызывают в проводниках АВ и БГ волнообразное распространение максимумов потенциала. На рис. 2 показаны электрическое и магнитное поля в двухпроводной линии. Силовые линии электрического поля "перекинуты" от положительно заряженных участков одного проводника к отрицательно заряженным участкам другого. Магнитные силовые линии охватывают проводники и расположены перпендикулярно электрическим линиям и скорости распространения волны.

Электромагнитные волны, распространяясь вдоль проводников АВ и БГ, отражаются от их концов подобно тому, как отражается от точки крепления волна, бегущая вдоль струны. Отраженная волна, идущая по направлению к генератору, складываясь с прямой волной, идущей от генератора, дает стоячую электромагнитную волну (рис. 3).

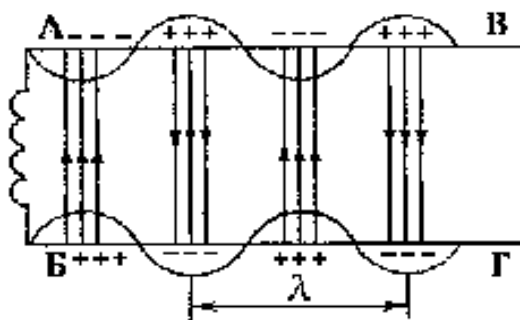


Рис. 2

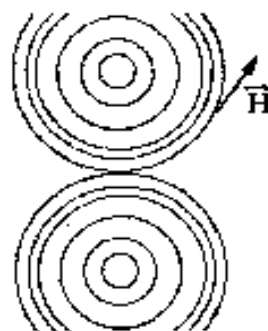


Рис. 3

Если посредством мостика лампочку накаливания Л перемещать вдоль проводников АВ и БГ (рис. 4), то накал лампочки будет меняться от нуля до некоторого максимального значения. Точки, в которых лампочка загорается до максимального накала, соответствуют максимальному значению силы тока и максимальному значению напряженности магнитного поля. Эти точки являются пучностями магнитного поля. Точки, в которых сила

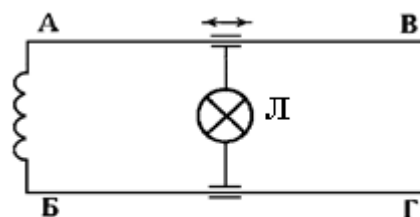


Рис. 4

тока равна нулю (лампочка не горит), являются узлами тока и электромагнитной волны. Если перемещать вдоль проводников мостик с неоновой лампочкой, реагирующей на электрическое поле, то можно выявить пучности и узлы электрического поля стоячей волны. С пучностями магнитного поля совпадают узлы электрического и, наоборот, с узлами магнитного поля совпадают пучности электрического поля.

Расстояние между двумя соседними пучностями, или узлами магнитного (электрического) поля, равно половине длины волны, распространяющейся вдоль проводников. Если это расстояние обозначить через l , то будем иметь

$$\lambda = 2l, \quad (1)$$

длину волны λ можно выразить следующим образом:

$$\lambda = cT = c/v, \quad (2)$$

где c – скорость распространения волны; T – период колебаний; v – частота колебаний.

Из формул (1) и (2) получаем

$$c = v\lambda = 2lv. \quad (3)$$

Зная частоту колебаний генератора и измерив длину волны, определим скорость распространения электромагнитных волн.

Порядок выполнения работы

1. Соединить генератор электрических колебаний с длинными параллельными проводниками и возбудить в них стоячую электромагнитную волну.

2. Перемещением вдоль проводников мостика, имеющего лампочку накаливания, выявить пучности и узлы магнитного поля стоячей волны. Измерить расстояние между первой и второй, первой и третьей, первой и четвертой пучностями магнитного поля.

3. Перемещать вдоль проводников мостик, имеющий неоновую лампочку, и выявить пучности и узлы электрического поля стоячей волны. Убедиться, что пучности электрического поля совпадают с узлами магнитного поля, и наоборот. Измерить расстояние между первой и второй, первой и третьей, первой и четвертой пучностями электрического поля.

4. Пользуясь формулой (3), вычислить скорость распространения электромагнитных волн и оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о явлениях, наблюдающихся в закрытом колебательном контуре.
2. Каков механизм образования стоячих волн в двухпроводной линии?

Список рекомендуемой литературы

1. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – § 231.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – § 105, 106.

3.8. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. РАЗДЕЛ «ОПТИКА»

При изучении раздела «Оптика» студенты осваивают основные понятия, явления и задачи волновой оптики, знакомятся с методами измерения оптических характеристик (длина волны, показатель преломления и т.п.), а также с применением оптических измерений в прикладных целях (определение концентрации раствора сахара). Необходимо отметить, что оптические приборы являются точными и дорогими инструментами, поэтому выполнять работы с их помощью следует особенно тщательно и аккуратно.

Лабораторная работа № 5-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цель работы: ознакомление с интерференцией, условием образования колец Ньютона и принципом их использования для практических целей.

Оборудование: микроскоп МИМ-7, выпуклая линза, плоскопараллельная стеклянная пластинка, светофильтр, сферометр ИЗС-7.

Введение

Согласно волновой теории свет представляет собой электромагнитную волну, в которой колеблются два взаимно перпендикулярных вектора: \vec{E} напряженности электрического поля и \vec{H} напряженности магнитного поля. Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются коле-

баниями вектора \vec{E} . В соответствии с этим о световом векторе обычно говорят, подразумевая под ним вектор \vec{E} .

Итак, плоскую световую волну, распространяющуюся, например, вдоль оси Z , можно представить в виде

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz - \alpha), \quad (1)$$

где $\vec{E}_0 = \text{const}$ – амплитуда колебания; $\omega = 2\pi / T$ – циклическая частота; T – период; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; α – начальная фаза волны. Длины волн видимого света заключены в пределах $4 \cdot 10^{-7} \text{ м} \leq \lambda \leq 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Волны одинаковой частоты, разность начальных фаз которых постоянна во времени, называются когерентными волнами, а источники когерентных волн называются когерентными источниками.

Рассмотрим наложение двух когерентных волн, линии колебаний которых совпадают. Пусть эти волны исходят из источников S_1 и S_2 (рис. 1).

Для простоты расчета допустим, что $E_{01} = E_{02} = E_0$ и $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$. Тогда согласно (1)

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t - kz_1), \quad E_2 = E_0 \cos(\omega t - kz_2).$$

С помощью формулы суммы тригонометрических функций $\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos[(\alpha + \beta) / 2]\cos[(\alpha - \beta) / 2]$ легко получить для результирующей волны

$$E = E_1 - E_2 = 2E_0 \cos[k(z_2 - z_1) / 2] \cos[\omega t - k(z_1 + z_2) / 2]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что в точках, где $\cos[k(z_2 - z_1) / 2] = 0$, суммарная амплитуда волны в любой момент времени равна 0 и волны взаимно гасятся. Координаты этих точек определяются условием $k(z_2 - z_1) / 2 = \pm(2m + 1)\pi / 2$ или с учетом $k = 2\pi / \lambda$:

$$\Delta = z_2 - z_1 = \pm(2m + 1)\lambda / 2 \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (3)$$

В точках, где $\cos[k(z_2 - z_1) / 2] = \pm 1$, суммарная амплитуда волны в любой момент времени принимает максимальное значение. Координаты этих точек определяются условием $k(z_2 - z_1) / 2 = \pm m\pi$ или

$$\Delta = z_2 - z_1 = \pm 2m\lambda / 2 \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (4)$$

Полученные результаты (3) и (4) показывают, что при наложении двух когерентных световых волн, имеющих одинаковые направ-

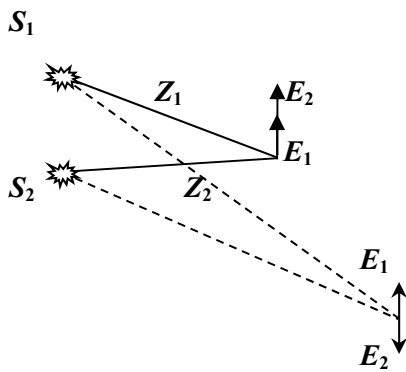


Рис. 1

ления колебаний, в одних точках волнового поля амплитуда результирующих колебаний резко уменьшается, а в других – возрастает. При этом интенсивность результирующей световой волны либо больше, либо меньше суммы интенсивностей падающих волн. Явление это называется *интерференцией световых волн*.

В данной работе используется интерференция в тонком слое, известная под названием колец Ньютона. Этот случай наблюдается, когда выпуклая поверхность линзы соприкасается в некоторой точке с плоской поверхностью хорошо отполированной пластинки, так что остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от точки соприкосновения к краям (рис. 2).

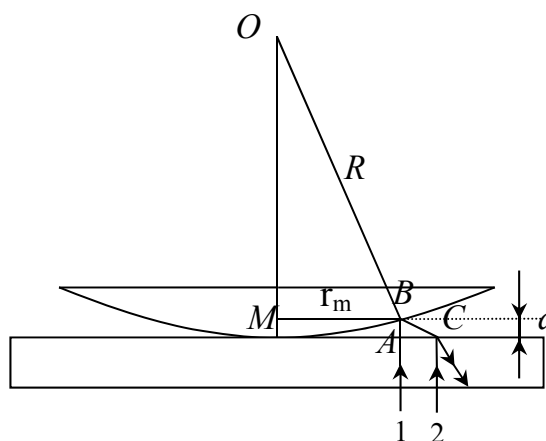


Рис. 2

Если на систему приблизительно нормально к плоской поверхности пластинки падает пучок монохроматического света, то световые волны, отраженные от нижней и верхних границ этой воздушной прослойки, будут интерферировать между собой, так как здесь наблюдаются все необходимые для света условия. При этом в точке соприкосновения получается темное пятно, и оно окружено рядом концентрических светлых и темных колец убывающей толщины. Нетрудно рассчитать размеры и положение колец Ньютона, предполагая, что свет падает нормально к поверхности пластинки. Показатель преломления воздуха $n \approx 1$ меньше показателя преломления стекла. Поэтому при отражении идущего снизу светового луча от границы воздух – линза теряется половина длины волны $\lambda/2$. Эта потеря равносильна увеличению оптической длины пути на $\lambda/2$ и должна учитываться при вычислении оптической разности хода Δ . Тогда оптическая разность хода лучей 1 и 2 (см. рис. 2): $\Delta = (AB + BC) + \lambda/2$. Ввиду того, что толщина воздушной прослойки d очень мала, $AB \approx BC \approx d$, поэтому

$$\Delta = 2d + \lambda/2. \quad (5)$$

Для подсчета кольца Ньютона рассмотрим треугольник OBM , где $OB = R$ – радиус кривизны линзы; $MB = r_m$ – радиус кольца Ньютона. Из рис. 2 следует

$$R^2 = (R - d)^2 + r_m^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r_m^2.$$

Так как d мало, то величиной d^2 можно пренебречь, и тогда $d = r_m^2/2R$. Подставляя это значение в (5), получим

$$\Delta = (r_m^2/R) + \lambda/2. \quad (5^*)$$

Для темного кольца, подставляя (5*) в соотношение (3), легко получить

$$r_m^2/R = m\lambda. \quad (6)$$

Из (6) можно определить λ (или R), но так как вследствие упругой деформации стекла невозможно добиться соприкосновения сферической линзы и плоской пластинки строго в одной точке, то более правильный результат получится, если вычислять λ (или R) по разности радиусов двух колец r_m и r_n . Тогда окончательная формула будет иметь вид $(r_m^2 - r_n^2) = (m - n)R\lambda$. Для расчетов это

$$\lambda = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{(m - n)R} \quad (m > n). \quad (7)$$

Отсюда, зная радиус кривизны линзы R и экспериментально определяя величины r_m и r_n , можно вычислить длину световой волны λ . Таким образом, для определения длины волны необходимо предварительно с достаточной точностью измерить радиус кривизны используемой линзы. Для этой цели в данной работе применяется специальный прибор сферометр ПЗС-7 (см. описание в лаборатории оптики).

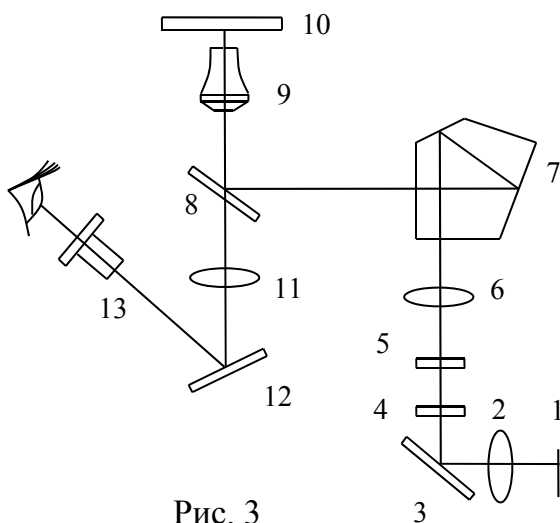


Рис. 3

Радиусы интерференционных колец измеряются при помощи микроскопа МИМ-7 (рис. 3). Нить накала лампы 1 коллиматором 2 и зеркалом 3 проектируется в плоскости апертурной диафрагмы 5. При этом свет проходит через светофильтр 4. Системой, состоящей из линз 6, призмы 7 и отражательной пластинки 8, апертурная диафрагма изображается в плоско-

сти опорного торца для объективов. Отражательная пластинка 8 направляет в объектив 9 лучи, которые, отразившись от объекта 10, вновь проходят через объектив, выходят из него параллельным пучком, проходят отражательную пластинку и попадают на ахроматическую линзу 11.

Объектив 9 служит не только для получения изображения, но и является частью осветительной системы. Выходящие из объектива параллельные лучи при помощи линзы 11 изображают объект в фокальной плоскости окуляра 13. При визуальном наблюдении в ход лучей вводится зеркало 12, которое отклоняет лучи в сторону окуляра. Общий вид микроскопа дан на рис. 4. На предметном столике 7 лежит стеклянная пластинка, на которой при помощи специальных зажимов укреплена выпуклая линза. Свет от источника попадает на выпуклую поверхность линзы снизу через объектив. При этом интерферируют луч, отраженный от верхней поверхности пластинки, и луч, отраженный от выпуклой поверхности линзы. Для получения качественной интерференционной картины необходимо, чтобы радиус кривизны линзы был достаточно большим.

Порядок выполнения работы

1. При помощи сферометра определить радиус кривизны линзы.
2. Включить лампу осветителя микроскопа МИМ-7 (см. рис. 4), поместив на оправе 6 осветительной линзы светофильтр, выделяющий световую волну, длина которой измеряется. При помощи диска 5 ввести дополнительно соответствующий светофильтр.
3. Сняв линзу, освободив стопорную рукоятку 8, сфокусировать микроскоп при помощи рукоятки грубой подачи столика 4 на верхнюю поверхность стеклянной пластинки, положив на нее какой-нибудь объект наблюдения (например, кусок миллиметровой бумаги или металлическую монету). Закрепив рукоятку 8, поставив затем линзу в прежнее положение, с помощью рукояток 3 установить стеклянную пластинку так, чтобы точка соприкосновения линзы и пластинки попала точно в центр поля зрения окуляра микроскопа 2. Образующиеся на границе воздушного слоя и стеклянной пластинки кольца Ньютона должны быть отлично видны. В противном случае исправить фокусировку микроскопа вращением барашка микрометрической подачи объектива 1. Если в точке соприкосновения вместо темного пятна получится светлое, необходимо протереть стекло и линзу от пыли.

4. При помощи рукояток 3 добиться, чтобы линия окулярной шкалы проходила через центр ньютоновских колец. Измерить в делениях окулярной шкалы диаметры D темных колец, фиксируя положение их левых (m_1) и правых (m_2) границ. Диаметры измерить три раза, поворачивая каждый раз окуляр со шкалой вокруг оптической оси микроскопа приблизительно на 60° , и вычислить среднее значение каждого диаметра.

5. Вычислить радиусы r_k по формуле

$$r_k = D_k/2 = (m_2 - m_1)1,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}/2 = (m_2 - m_1)6,0 \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

где $1,2 \cdot 10^{-3}$ см – цена наименьшего деления шкалы. Занести их в таблицу.

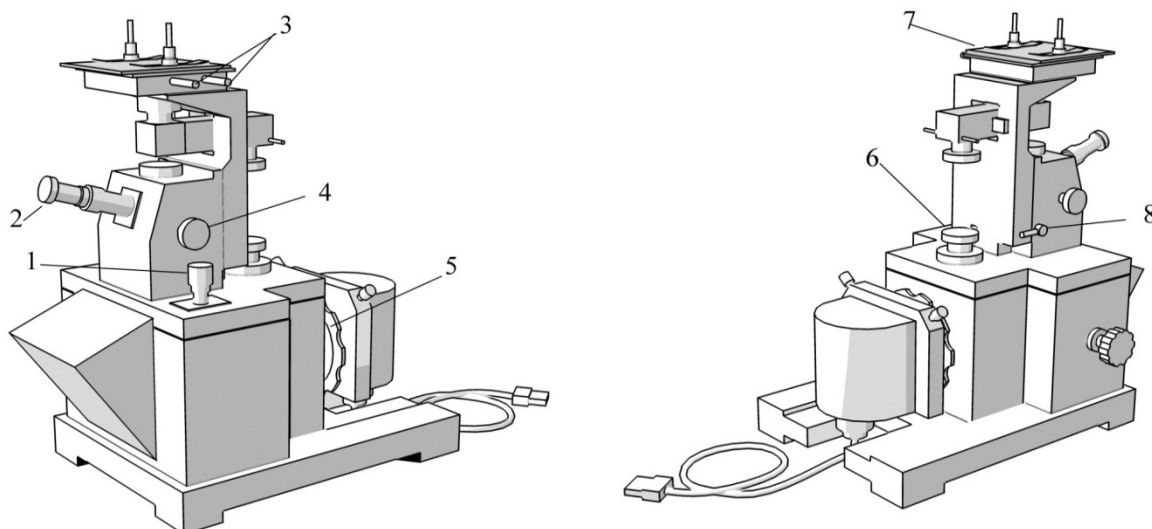


Рис. 4

6. Комбинируя попарно радиусы колец, по формуле (7) определить длину световой волны. В целях повышения точности результата рекомендуется комбинировать радиус кольца номера k с радиусом кольца номера $k - 2$, кольца $k - 1$ с $(k - 2) - 1$ и т.д. Из полученных значений λ вычислить среднее значение длины световой волны.

Контрольные вопросы

1. Почему радиус кривизны линзы, применяемой в данной работе, должен быть достаточно большим?
2. В чем состоит явление интерференции волн?
3. Почему интерференционная картина в данной работе имеет характер колец?
4. Как изменяется интерференционная картина в проходящем свете по сравнению с той же картиной в отраженном свете? Почему?

5. Почему в центре ньютоновских колец получается темное пятно?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 928 с.

Лабораторная работа № 5-4

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС РАВНОГО НАКЛОНА С ПОМОЩЬЮ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции на примере полос равного наклона и определение показателя преломления стекла.

Оборудование: газовый лазер, микроскопический объектив, экран с круглым отверстием, плоскопараллельная стеклянная пластина.

Введение

При падении расходящегося пучка монохроматического света на плоскопараллельную прозрачную пластину будут наблюдаться так называемые полосы равного наклона, представляющие собой интерференционные максимумы и минимумы. Они имеют вид концентрических светлых и темных колец, толщина которых уменьшается от центра к периферии. Согласно теории интерференции в параллельных пластинах темные кольца удовлетворяют условию

$$2hnc\cos\beta_m = m\lambda, \quad (1)$$

где h – толщина пластины; n – показатель преломления пластины; β_m – угол преломления; λ – длина падающей световой волны; $m = 0, 1, 2, \dots$ (порядок интерференции); S – источник света (рис. 1).

При малых углах падения α_m и преломления β_m можно полагать

$$\cos\beta_m \approx 1 - \beta_m^2/2; \quad (2)$$

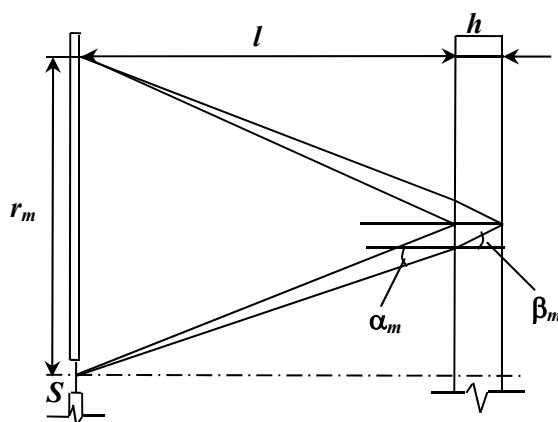


Рис. 1

$$n = \sin \alpha_m / \sin \beta_m \approx \alpha_m / \beta_m; \quad (3)$$

$$\alpha_m \approx \text{tg } \alpha_m = r_m / (2l), \quad (4)$$

где r_m – радиус m -го темного кольца; l – расстояние от плоскости экрана до поверхности пластины. С учетом (2) – (4) из (1) легко установить

$$r_m^2 / l^2 = 8n^2 - 4n\lambda m / h. \quad (5)$$

Из этой формулы видно, что величина r_m^2 / l^2 линейно зависит от порядка, интерференции m (рис. 2). Очевидно, что $r_m^2 / l^2 = 0$ при $4n\lambda m / h = 8n^2$. Отсюда можно определить максимальный порядок интерференции

$$m_{\max} = 2nh / \lambda. \quad (6)$$

При уменьшении порядка интерференции радиус кольца увеличивается, а при $m = 0$ имеет место $r_0 = \sqrt{8} nl = r_{\max}$.

Порядок интерференции m совпадает с порядковым номером интерференционного кольца. Но определить порядковый номер кольца

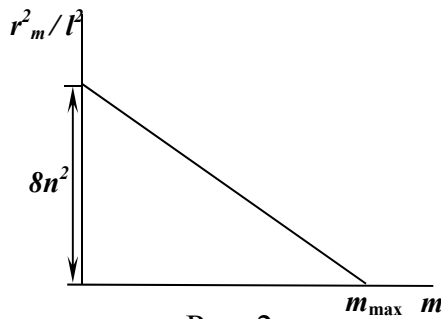


Рис. 2

практически невозможно (см. лабораторную работу № 5 – 3): большие кольца с малыми порядковыми номерами настолько близко располагаются друг к другу, что их трудно различить и нет возможности фиксировать начало отсчета. Это, в свою очередь, делает невозможным определение показателя преломления пластины с помощью формулы (5), измерением величин h , l и r_m .

Чтобы обойти эту трудность, необходимо измерить еще одно интерференционное кольцо, отстоящее от первого, например, на N порядков. Тогда

$$r_{m-N}^2 / l^2 = 8n^2 - 4n\lambda(m - N) / h. \quad (7)$$

Вычитая соотношение (7) из соотношения (5), получим

$$(r_{m-N}^2 - r_m^2) / l^2 = 4n\lambda N / h.$$

Отсюда

$$n = h(r_{m-N}^2 - r_m^2) / 4\lambda l^2 N. \quad (8)$$

Полученная формула дает возможность вычислить показатель преломления пластины, не зная порядкового номера измеряемых интерференционных колец.

Работа проводится на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 3. Здесь 1 – газовый лазер, 2 – микроскопический объектив, 3 – экран с круглым отверстием, 4 – плоскопараллельная стеклянная пластина. Рейтеры, на которых стоят все принадлежности, позволяют осуществлять необходимую юстировку всей оптической системы. Длина волны лазерного излучения $\lambda = 632,8$ нм, толщина стеклянной пластины $h = 20,0$ мм.

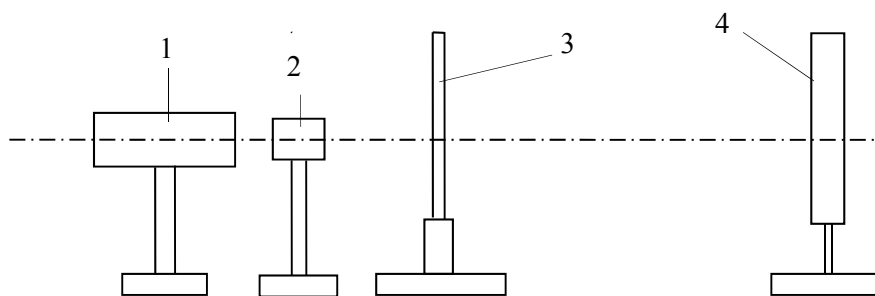


Рис. 3

Порядок выполнения работы

Ознакомившись с элементами и работой всех узлов установки, включить лазер (включение лазера осуществляется только преподавателем или лаборантом).

Обращаем внимание на то, что попадание в глаза прямого лазерного пучка ОПАСНО для зрения. При работе с лазером его свет можно наблюдать только после отражения от рассеивающих поверхностей.

Вывести из хода луча объектив 2 и экран 3 (см. рис. 3). Ориентировать пластину 4 перпендикулярно к направлению пучка света так, чтобы отраженный от нее пучок падал в центр выходного отверстия лазера. Затем ввести в ход пучка и тщательно центрировать микроскопический объектив с круглым отверстием экрана. На экране при этом должна появиться система концентрических светлых и темных колец.

Задание 1. Определение показателя преломления плоскопараллельной стеклянной пластинки.

1. Пронумеровать темные кольца, радиусы которых подлежат измерению. Целесообразно нумеровать их, начиная с кольца с минимальным радиусом, которому можно присвоить, например, номер m . Приписать пяти последующим кольцам номера $m, m - 1, m - 2, \dots, m - 5$.

2. Измерить шесть выделенных колец $m, m - 1, m - 2, \dots, m - 5$ с помощью линейки в двух взаимно перпендикулярных направлениях (для каждого кольца – два значения радиуса).

3. Найти среднее значение радиуса каждого темного кольца r_{m-N} и его квадрат r_{m-N}^2 .

4. Построить график зависимости r_{m-N}^2 от номера кольца $m - N$. Линия, проводимая по полученным экспериментальным точкам, должна быть прямой. Масштабы по обеим осям координат следует выбрать так, чтобы получившаяся прямая составляла приблизительно угол в 45° с осями координат (так обычно делают при графическом изображении функциональных зависимостей).

5. Из наклона прямой вычислить отношение $(r_{m-N}^2 - r_m^2)/N$.

6. Измерить расстояние l от плоскости экрана 3 до поверхности пластины 4 (см. рис. 3).

7. Вычислить по формуле (8) показатель преломления n и определить погрешность.

Задание 2. *Определение максимального порядка интерференции.*

Вычислить m_{\max} по формуле (6). Для m_{\max} может получиться не целое число, т.е. в центре интерференционной картины, где $r_m = 0$, не обязательно будет темное пятно.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой полосы равного наклона?
2. Что такое порядок интерференции?
3. Почему наблюдаемая в данной работе интерференционная картина имеет вид концентрических окружностей?
4. Почему интерференционные кольца в периферии располагаются гуще, чем в центральной области?
5. Какие условия необходимы для интерференции света?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976. – 928 с.

Лабораторная работа № 5-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: изучение явления дифракции света и ознакомление с одним из методов определения длины световой волны при помощи дифракционной решетки.

Оборудование: источник света, дифракционная решетка, экран с миллиметровым масштабом, измерительная линейка, набор светофильтров.

Введение

Огибание световой волной границ непрозрачных тел за счет интерференционного перераспределения энергии по различным направлениям называется *дифракцией световой волны*. Рассмотрим сначала дифракцию на одной щели.

Если на щель шириной a перпендикулярно ей падает параллельный пучок света (рис. 1), то напряженность E_φ , которую будут иметь дифрагированные электромагнитные волны длиной λ , собираемые линзой в точке M_φ на экране MM , можно рассчитать следующим образом:

$$E_\varphi = \int_0^a \frac{E_0}{a} \cos(\omega t - kx \sin \varphi - kR) dx, \quad (1)$$

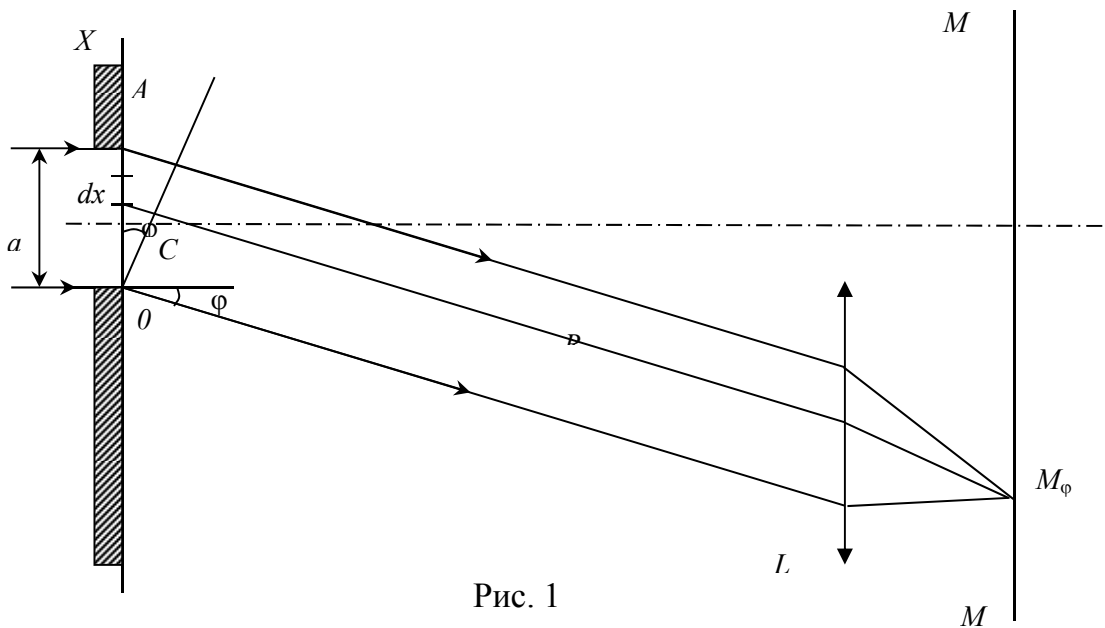


Рис. 1

где E_0 – амплитуда напряженности электрического поля в направлении $\varphi=0$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $R = CM_\varphi$. Здесь учтено, что линза L не вносит дополнительной разности фаз (таутохронизм). После интегрирования из (1) получим:

$$E_\varphi = E_0 \frac{\sin\left(\frac{ka}{2} \sin\varphi\right)}{\frac{ka}{2} \sin\varphi} \cos(\omega t - \alpha_0), \quad (2)$$

где $\alpha_0 = \frac{ka}{2} \sin\varphi + kR$. Амплитуда колебания (2)

$$E_{\varphi 0} = E_0 \frac{\sin\left(\frac{ka}{2} \sin\varphi\right)}{\frac{ka}{2} \sin\varphi} = E_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin\varphi\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin\varphi}. \quad (3)$$

Минимум колебаний в результате интерференции дифрагированных лучей в направлении φ определяется согласно (3) условием

$$a \sin\varphi = \pm m\lambda \quad (m=1, 2, \dots). \quad (4)$$

В направлении $\varphi = 0$ наблюдается максимум колебаний, для которого согласно уравнению (3) $E_{\varphi 0} = E_0$. График распределения интенсивности $E_{\varphi 0}^2$ представлен на рис. 2 жирной линией.

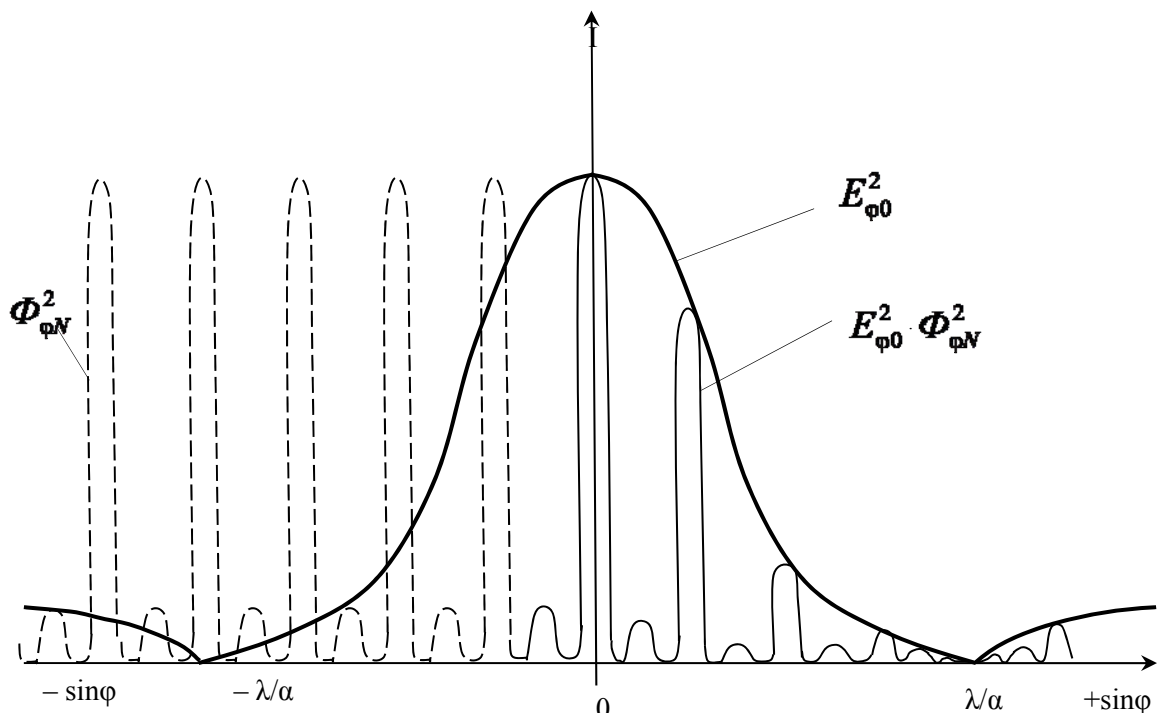


Рис. 2

Теперь рассмотрим дифракцию параллельного пучка лучей, которые падают нормально к плоскости дифракционной решетки. Простейшая дифракционная решетка представляет собой прозрачную пластинку, на которой нанесены параллельные друг другу царапины и оставлены узкие неповрежденные полосы. Прозрачные места непрозрачны для света, и неповрежденные полосы образуют систему параллельных щелей.

Принято называть *периодом решетки (постоянной решетки)* сумму размеров прозрачной a и непрозрачной b полос: $d = a + b$ (рис. 3).

В силу таутохронизма линзы фазы колебаний соответствующих лучей, например 1 и 2 (см. рис. 3), проходящих через ближайшие щели, в точке M_ϕ на экране MM будут отличаться друг от друга только на величину

$$\alpha = (2\pi/\lambda) d \sin\phi. \quad (5)$$

Общую напряженность в точке M_ϕ на экране MM , которая создается волнами, идущими в направлении ϕ , можно вычислить через напряженность отдельных волн $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$, проходящих сквозь щели:

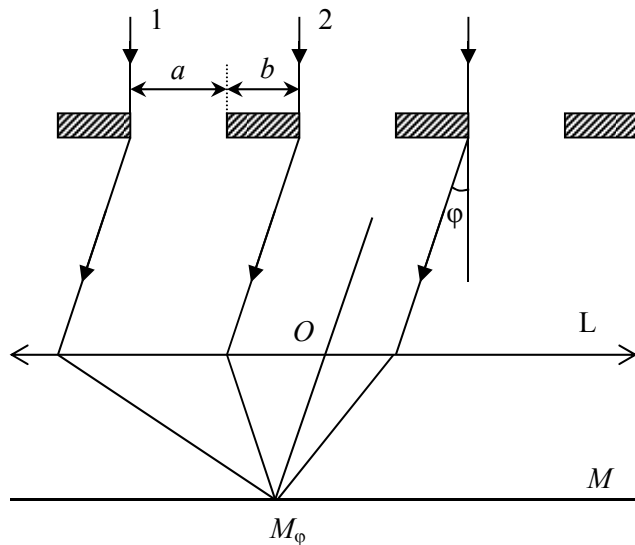


Рис. 3

можно вычислить через напряженность отдельных волн $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$, проходящих сквозь щели:

$$\vec{E}_{\phi N} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N, \quad (6)$$

где N – число щелей. Величины $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$ могут быть определены из выражения (2). Поскольку направления колебаний векторов \vec{E} одинаковы, то векторную сумму (6) можно заменить арифметической. Учитывая, что для одинаковых щелей амплитуды векторов напряженности $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$ будут равны одной и той же величине $\vec{E}_{\phi 0}$, вместо (6) можно написать

$$E_{\phi N} = E_{\phi 0} \{ \cos(\omega t - \alpha_0) + \cos(\omega t - \alpha_0 - \alpha) + \cos(\omega t - \alpha_0 - 2\alpha) + \dots + \cos[\omega t - \alpha_0 - (N-1)\alpha] \}. \quad (7)$$

Удобно найти сумму, входящую в выражение (7), графическим методом, основанным на возможности представления гармонического колебания с помощью вращающегося вектора амплитуды. Для этого расположим модули векторов $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$, как показано на рис. 4.

Направления ближайших отрезков отличаются друг от друга на угол α , определяемый соотношением (5). Этим учитывается различие в начальных фазах колебаний.

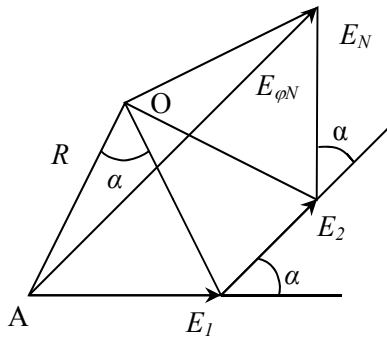


Рис. 4

Из рис. 4 легко видеть, что амплитуда результирующего колебания будет определяться отрезком $AN = 2R \sin(N\alpha/2)$, а $E_{\varphi 0} = E_i = 2R \sin(\alpha/2)$. Поэтому

$$AN = E_{\varphi 0} \frac{\sin(N\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}. \quad (8)$$

С учетом соотношений (3) и (5) из (8) получим выражение для амплитуды напряженности электрического поля световой волны, которая после дифракции на решетке распространяется в направлении φ :

$$(E_{\varphi N})_0 = E_0 \frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi) \cdot \sin(N \frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi \cdot \sin(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi)}. \quad (9)$$

Из полученного результата (9) можно сделать выводы.

1. Распределение интенсивности светового потока при дифракции на решетке определяется произведением двух функций:

$$E_{\varphi 0}^2 = E_0^2 \frac{\sin^2(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi)}{(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi)^2} \quad \text{и} \quad \Phi_{\varphi N}^2 = \frac{\sin^2(N \frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi)}{\sin^2(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi)}.$$

2. Главные минимумы определяются из условия

$$\sin(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi) = 0, \text{ т.е. } a \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, \dots),$$

которое справедливо для любого количества щелей.

3. Главные максимумы определяются из условия $\sin(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi) = 0$, т.е.

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (10)$$

4. Дополнительные минимумы найдем из условия

$$\sin(N \frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi) = 0, \text{ т.е. } d \sin \varphi = \pm m \frac{\lambda}{N} \quad (m = 1, 2, \dots, m \neq N).$$

Легко увидеть, что световой поток в результате дифракции перераспределяется в основном вблизи направлений, соответствующих

главным максимумам. Распределение интенсивности света $I = E_{\varphi 0}^2 \cdot \Phi_{\varphi N}^2$ приведено на рис. 2. Как уже было отмечено, функция $E_{\varphi 0}^2$ была изображена жирной линией, функция $\Phi_{\varphi N}^2$ показана штриховой линией.

Если источник света испускает волны различных длин, то в результате дифракции на экране появятся освещенные полосы, окрашенные в различные цвета (максимумы света), так как согласно (10) направление главного максимума зависит от длины волны. Другими словами, дифракционная решетка представляет собой спектральный прибор.

Соотношение (10) является основной расчетной формулой для вычисления длин световых волн при помощи дифракционной решетки и называется формулой дифракционной решетки. При известной длине световой волны эта формула дает возможность определить постоянную дифракционной решетки d . Целое число m в формуле (10) называется порядком спектра и представляет собой номер спектра по отношению к центральной нулевой полосе.

Метод, применяемый в данной работе, заключается в том, что дифракционный спектр рассматривается без помощи линзы непосредственно на экране, находящемся на большом расстоянии от решетки (рис. 5).

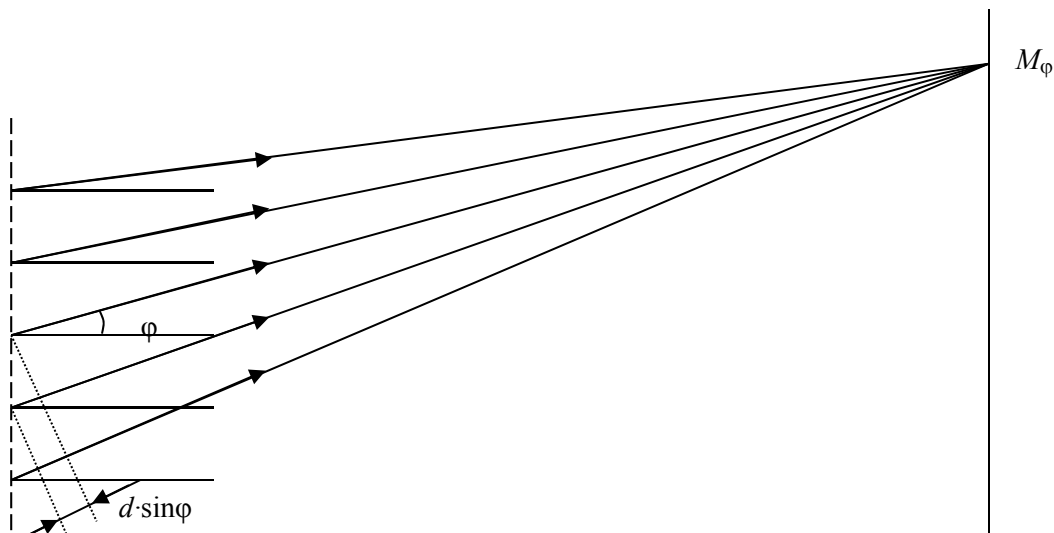


Рис. 5

При большом расстоянии между решеткой и экраном лучи, проходящие в точку M_φ из разных участков решетки, становятся почти параллельными, и поэтому условия дифракционных максимумов и минимумов могут реализоваться на экране без помощи собирающей линзы.

Схема установки приведена на рис. 6. RR – дифракционная решетка, на которую падает параллельный пучок лучей из осветительной системы S ; l – расстояние от дифракционной решетки до экрана MM ; x_m – расстояние между средними точками полос одного и того же цвета для спектров 1-го, 2-го и т.д. порядков.

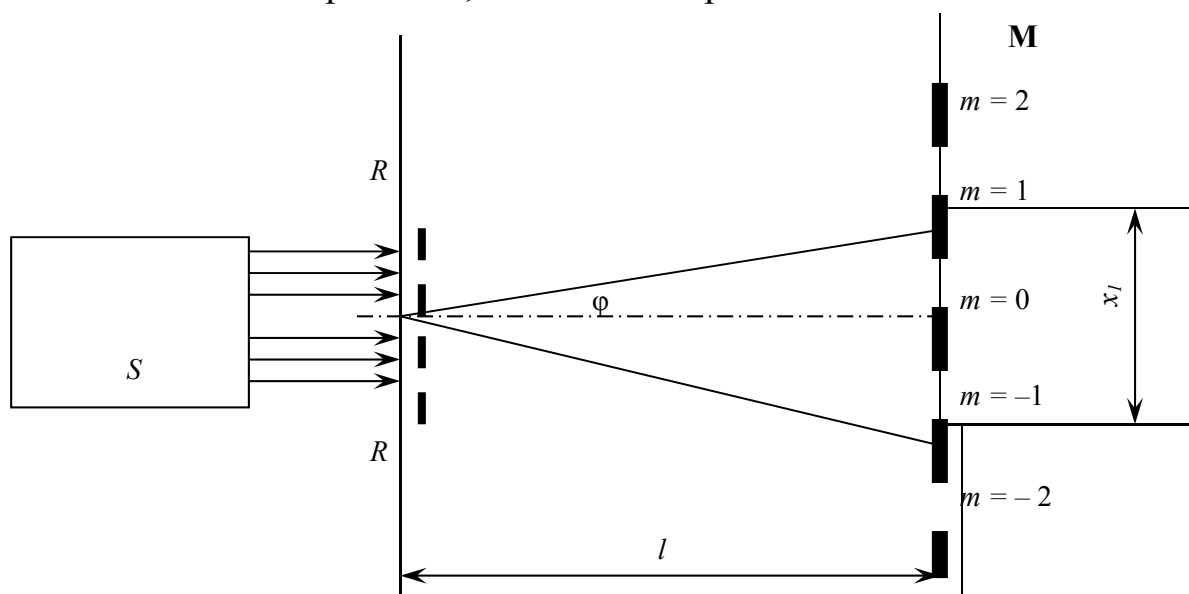


Рис. 6

Для определения длины волны λ или постоянной решетки d в формуле (10) необходимо знать $\sin \varphi$. Так как $x_m/l \ll 1$, то $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = x_m/2l$ (см. рис. 6). Подставляя значения $\sin \varphi$ в (10), получим:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{x_m}{2ml}. \quad (11)$$

Порядок выполнения работы

1. Включить осветительную систему. Если в качестве источника используется лазер, то его включает преподаватель.
2. Установить экран так, чтобы на нем получилось четкое изображение центральной полосы и спектров 1-го и 2-го порядков.
3. Измерить расстояние от экрана до дифракционной решетки.
4. Измерить на экране расстояние между серединами освещенных полос определенного цвета (по указанию преподавателя) x_1 спектра 1-го порядка.

5. Аналогично определить расстояние x_2 в спектре 2-го порядка.
6. Полученные значения l и x_m подставить в формулу (11) и по указанию преподавателя вычислить длину световой волны или постоянную дифракционной решетки.
7. Вычислить погрешность.

Контрольные вопросы

1. Что называется дифракцией света?
2. Как происходит дифракция на одной щели?
3. Как перераспределяется поток световых волн на дифракционной решетке?
4. Как изменяется дифракционная картина от многих щелей по сравнению с дифракцией от одной щели?
5. Каким образом можно определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976. – 928 с.

Лабораторная работа № 5-7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЯРИМЕТРА

Цель работы: ознакомление с вращением плоскости колебаний света в оптически активных веществах и практическим применением данного явления для определения концентрации растворов.

Оборудование: поляриметр СМ, трубки с раствором сахара, линейка.

Введение

При прохождении плоскополяризованного света через некоторые вещества плоскость колебаний поворачивается, что обусловлено особым строением молекул – отсутствием в них зеркальной симметрии. Такие вещества называются *оптически активными*. Примером оптически активной среды является, например, водный раствор сахара. Оптической активностью обладают и некоторые кристаллы, например кварц. Его активность связана с асимметрией строения кристаллической решетки.

Угол φ , на который поворачивается плоскость колебаний в оптически активных растворах, прямо пропорционален толщине слоя раствора и концентрации вещества:

$$\varphi = \alpha_0 LC, \quad (1)$$

где L – толщина слоя, дм; C – концентрация, г/см³; α_0 – коэффициент, называемый удельным вращением растворенного вещества (постоянная вращения), град·см³/(дм·г).

Постоянная вращения зависит от длины волны падающего света и температуры раствора. У сахарных растворов при $T = 20^\circ\text{C}$ для желтых лучей $\lambda = 0,589$ нм, $\alpha_0 = 66,46$ град·см³/(дм·г).

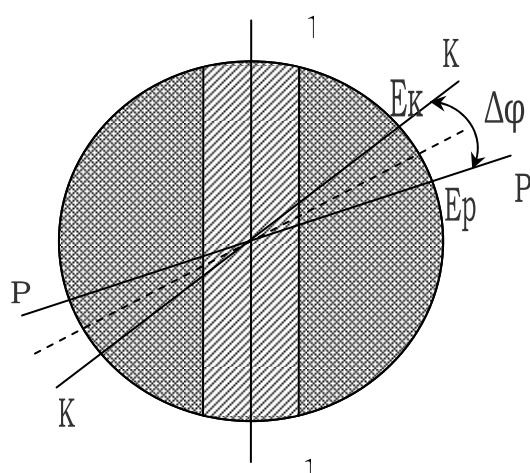
В общем случае величину α_0 надо определить экспериментально, зная величины C и L и измеряя угол поворота φ :

$$\alpha_0 = \frac{\varphi}{LC}. \quad (2)$$

Зная величины α_0 и L , измеряя угол поворота φ для раствора с неизвестной концентрацией, можно вычислить

$$C = \frac{\varphi}{L\alpha_0}. \quad (3)$$

Приборы, служащие для количественного исследования вращения плоскости колебаний, называются поляриметрами. В данной работе пользуются одним из наиболее точных приборов – полутеневым поляриметром типа СМ. Световой пучок в этом приборе, пройдя поляризатор, своей средней частью проходит через кварцевую пластину



и анализатор, а двумя крайними частями – только через анализатор. Кварцевая пластина поворачивает плоскость колебаний на небольшой угол $\Delta\varphi = 5 - 7^\circ$ от плоскости пропускания поляризатора PP до плоскости KK .

Интенсивности света (и, следовательно, освещенности соответствующих частей поля зрения прибора) пропорциональны квадратам проекций E_p – амплитуды светового вектора, прошедшего только через поляризатор,

E_k – то же для светового вектора, прошедшего через кварц (средняя часть поля зрения) на плоскость пропускания анализатора AA .

Нетрудно увидеть, что здесь возможны лишь два положения анализатора, при которых проекции амплитуд векторов E_p и E_k равны, и освещенности частей поля зрения одинаковы: 1) когда плоскость пропускания анализатора AA совпадает с биссектрисой угла $\Delta\varphi$ (все три части поля зрения одинаково ярко освещены); 2) когда плоскость анализатора AA перпендикулярна биссектрисе угла $\Delta\varphi$ (все три части поля зрения одинаково затемнены). Второе положение может быть зафиксировано точнее, так как чувствительность глаза намного выше при меньшей освещенности. Поэтому поляриметр следует настраивать на равное затемнение, что соответствует почти полному скрещиванию поляризатора и анализатора ($86 - 87^\circ$). Это положение анализатора называется нулевой точкой.

Трубка с исследуемым раствором помещается между поляризатором с кварцевой пластиной и анализатором. Если исследуемое вещество оптически активно, то оно поворачивает плоскость колебаний всех лучей, идущих и через кварц, и мимо него, на определенный угол φ . Интенсивности частей поля зрения становятся различными. Но можно снова добиться одинакового затемнения тройного поля зрения поворотом анализатора на тот же угол φ , который измеряется по шкале анализатора.

Головка анализатора состоит из неподвижного лимба, двух вращающихся с помощью фракциона нониусов и зрительной трубы (окуляра). На лимбе нанесено 360 делений. Нониусы имеют 20 делений (цена деления нониуса $0,05^\circ$). Для учета эксцентриситета круга при больших углах вращения необходимо пользоваться двумя нониусами и результатом измерения считать среднее значение показаний двух нониусов. Окуляр фокусируется перемещением муфты вдоль оси прибора. В раковинах окуляра находятся две лупы, которые дают увеличенные изображения нониусов.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что трубка с раствором сахара вынута из поляриметра. Включить осветитель в сеть переменного тока.
2. Закрывать шторку поляриметра, фокусировать зрительную трубку и вращением анализатора добиться равномерного затемнения тройного поля зрения.

3. Записать показания одного определенного нониуса. Если нуль нониуса оказался смещенным относительно нуля лимба по часовой стрелке, то поправке приписывают знак плюс, если против – минус. Если показания другого нониуса отличны от записанных, то надо снять показания обоих нониусов, а при расчете пользоваться их средним арифметическим.

4. Сделав отсчет на лимбе, повернуть анализатор в сторону и повторить пункты 2 и 3 не менее пяти раз, после чего найти среднее положение нулевой точки анализатора на лимбе.

5. Поместить в прибор трубку с раствором известной концентрации и закрыть шторку.

6. Фокусировать трубку (если фокусировка нарушена), установить равномерную затемненность поля зрения и записать показания лимба и нониуса (или двух, см. п. 3).

7. Повторить п. 6 не менее пяти раз, каждый раз отводя анализатор в сторону и приводя его обратно в положение, при котором поле зрения поляриметра будет равномерно затемнено. Взяв среднее из приведенных отсчетов, найти угол φ , на который была повернута плоскость колебаний светового вектора.

8. Из полученных результатов по формуле (2) вычислить удельное вращение сахара.

9. Выполнить пп. 5 – 7 для трубки с раствором неизвестной концентрации.

10. Из полученных результатов по формуле (3) вычислить процентное содержание сахара в растворе с неизвестной концентрацией.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется вращение плоскости колебаний светового вектора в оптически активных веществах?

2. Почему в используемом поляриметре наблюдается тройное поле зрения?

3. Какой способ уравнивания световых полей применяется в поляриметре типа СМ?

4. От чего зависит угол поворота плоскости колебаний светового вектора?

5. Почему в данном методе не используется установка на одинаково яркую освещенность тройного поля зрения?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976. – 948 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.

Лабораторная работа № 5-8

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: изучение явления поляризации света, проверка закона Малюса.

Оборудование: полупроводниковый лазер, блок питания, поляроид с лимбом, фотодиод, микроамперметр.

Введение

Свет представляет собой электромагнитные волны, в которых напряженность электрического поля \vec{E} , напряженность магнитного поля \vec{H} и скорость распространения \vec{v} взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему (рис. 1).

Вместе с тем световые волны, излучаемые обычными источниками, не обнаруживают асимметрии относительно направления распространения.

Это связано с тем, что свет складывается из множества цугов волн, испускаемых отдельными атомами. Направление колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} для каждого цуга случайное, и потому

в результирующей волне колебания различных направлений представлены с равной вероятностью. Таким образом, естественный свет – совокупность электромагнитных волн со всеми возможными направлениями колебаний, существующими одновременно или быстро и беспорядочно сменяющимися друг друга; совокупность эта статистически симметрична относительно луча, т.е. характеризуется неупорядоченностью направлений колебаний (рис. 2).

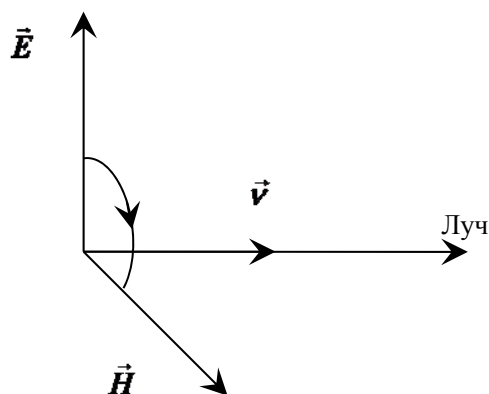


Рис. 1

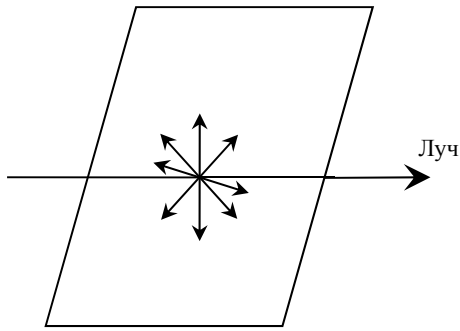


Рис. 2

Свет, в котором колебания вектора \vec{E} , а следовательно, и вектора \vec{H} проходят только в одной неподвижной плоскости, называют плоскополяризованным (линейнополяризованным). Плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} , называется *плоскостью поляризации*.

Устройство для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения называется *поляризатором*. Поляризатор свободно пропускает колебания, параллельные плоскости, называемой *плоскостью поляризатора*, и задерживает колебания, перпендикулярные этой плоскости.

Если плоскополяризованный свет с амплитудой электрического вектора \vec{E}_0 падает на анализатор (это поляризатор, используемый для анализа поляризованного света), то анализатор пропустит только составляющую $E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi$

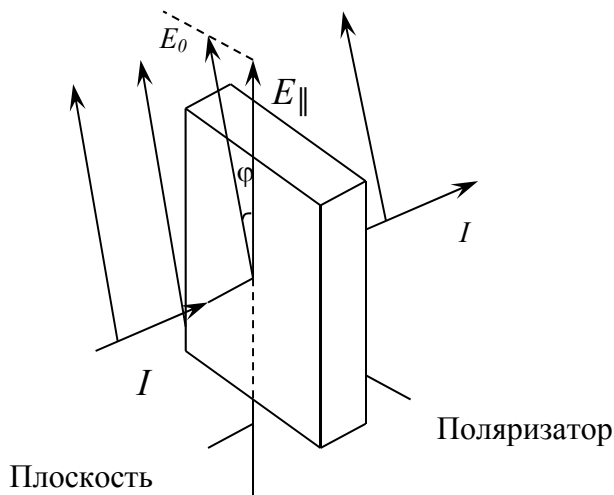


Рис. 3

(рис. 3), параллельную плоскости поляризатора. Отношение интенсивности прошедшего J к интенсивности падающего J_0 света:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{E_{\parallel}^2}{E_0^2}.$$

Напомним, что интенсивность света в данной точке пространства равна среднему по времени потоку энергии через единицу площади перпендикулярно направлению распространения волны и пропорционально квадрату амплитуды вектора E , т.е. $J \sim |\vec{E}|^2$. Учитывая, что $E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi$, получаем $J = J_0 \cos^2 \varphi$.

Это соотношение называется *законом Малюса* (Э. Л. Малюс – французский физик). Физический смысл этого закона состоит в том, что *интенсивность прошедшего через поляризатор поляризованного света пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостями поляризации и поляризатора*.

Описание установки

Схема установки показана на рис. 4. Излучение полупроводникового лазера 3 (с блоком питания 1) проходит через поляроид 4, который может вращаться относительно лазерного луча вместе с лимбом 5, где имеется угловая шкала в градусах (поляроид – поляризационный прибор, пропускающий световые волны, поляризованные в определенной плоскости – плоскости поляризатора). Далее световой луч попадает на фотодиод 6, преобразующий световое излучение в электрический ток, измеряемый микроамперметром 7. Считая зависимость ЭДС фотодиода от интенсивности падающего на него излучения (и соответственно тока) близкой к линейной, можно считать ток микроамперметра пропорциональным интенсивности излучения: $I = kJ$. В этом случае зависимость силы тока I от квадрата косинуса угла между плоскостью поляризации излучения и плоскостью поляризатора описывается зависимостью, соответствующей закону Малюса.

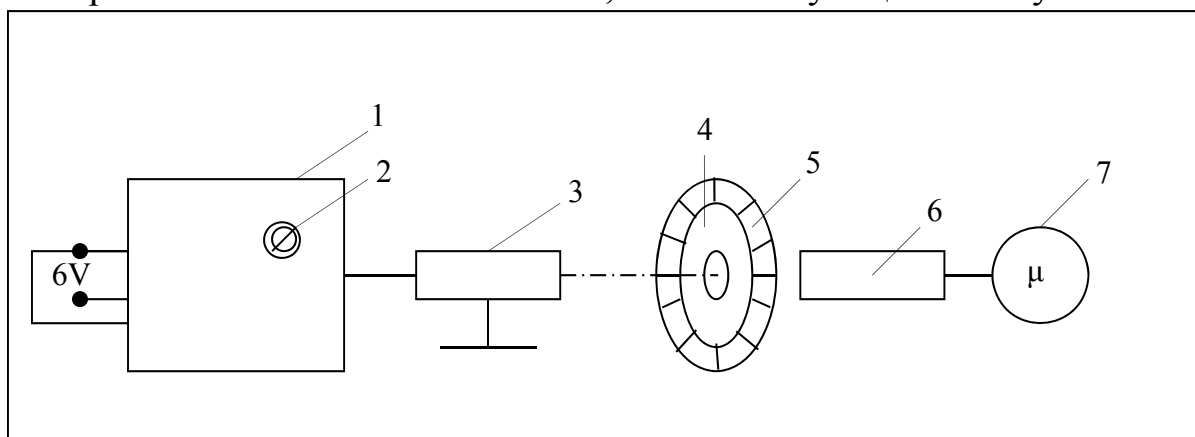


Рис. 4

Порядок выполнения работы

1. Подключить блок питания БП 1 специальной вилкой к напряжению 6 В.
2. Включить БП тумблером 2.
3. Направить луч лазера 3 точно в центр лимба с поляроидом на вход фотодиода.
4. Снять показания микроамперметра в зависимости от положения флажка лимба поляроида I (φ). Для этого вращением лимба добиться максимального значения тока и считать соответствующее показание φ_0 началом отсчета углового перемещения ($\varphi_0 = 0$). Вращать

лимб, и через каждое деление лимба измерять силу тока до его минимального значения 0. Занести в таблицу измеренные значения.

№ п/п	φ , град	$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$	$\cos^2 \Delta\varphi$	I , мкА	I/I_{\max}
1					
2					
3					
4					

5. Построить график $I (\cos^2 \Delta\varphi)$ на миллиметровой бумаге. (Убедиться, что при $\Delta\varphi = 90^\circ$, $I \rightarrow \min$).

6. Найти отношение I/I_{\max} , занести в таблицу и сравнить с соответствующими значениями строчки $\cos^2 \Delta\varphi$.

7. Сделать соответствующие выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается поляризованный свет от естественного?
2. Что такое плоскость поляризации?
3. Какое устройство называется поляризатором?
4. Что называется плоскостью поляризатора?
5. В чем смысл закона Малюса?

Список рекомендуемой литературы

1. Трофимова, Т. И. Оптика и атомная физика: законы, проблемы, задачи / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1999. – 288 с.
2. Иродов, И. Е. Волновые процессы. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. ; СПб : Физматлит, 2001. – 253 с.
3. Методические указания к лабораторным работам по физике. Геометрическая, волновая и молекулярная оптика / под ред. А. Ф. Галкина ; Владим. гос. техн. ун-т. – Владимир, 1994. – 84 с.

Раздел 4. ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа № 1

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ NI ELVIS

Цель работы: ознакомление с устройством установки NI ELVIS фирмы Nation Instrument.

Виртуальные лабораторные работы реализуются на электронном комплексе NI ELVIS (*National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite*). Он представляет собой настольную макетную плату и комплект программного обеспечения в среде LabVIEW для проведения широкого спектра лабораторных работ. Элементы управления расположены на передней панели установки (рис. 1):

- 1) индикатор *System Power* (питание системы);
- 2) переключатель *Prototyping Board Power* (питание макетной платы);
- 3) переключатель *Communications* (связь);
- 4) элементы управления регулируемыми блоками питания;
- 5) элементы управления функциональным генератором;
- 6) клеммы мультиметра;
- 7) клеммы осциллографа.

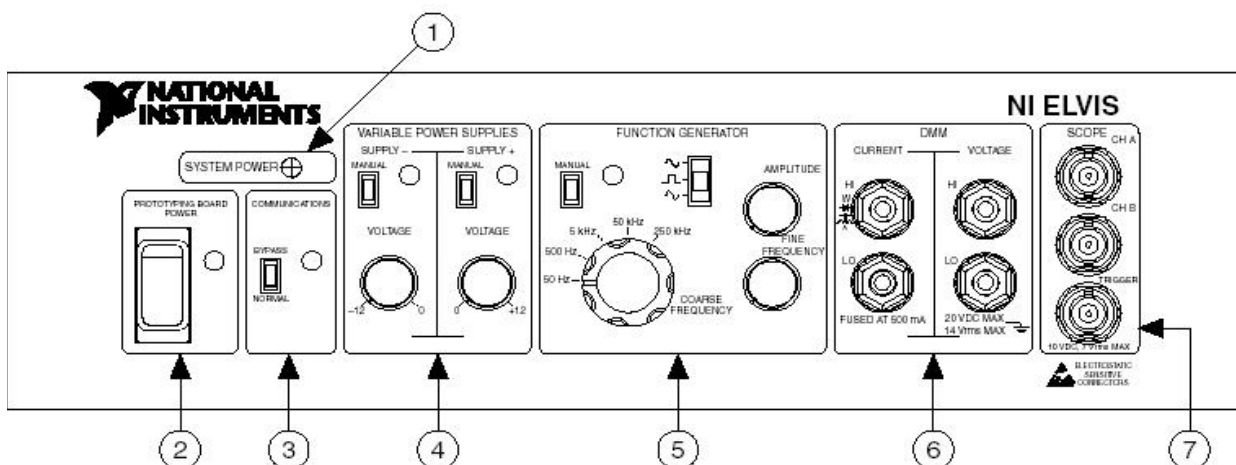


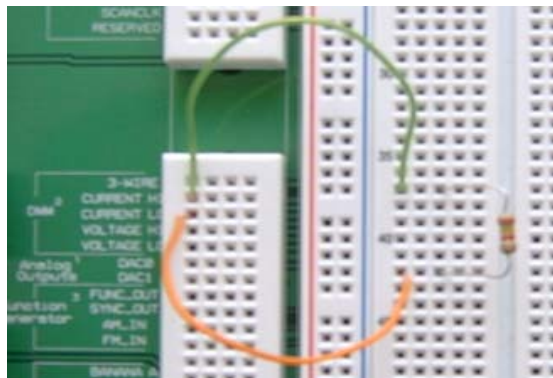
Рис. 1

Оборудование: установка NI ELVIS, персональный компьютер.
Набор радиоэлементов:

- резистор R_1 номиналом 1,2 кОм – 1 шт.;
- резистор R_2 номиналом 2,4 кОм – 1 шт.;
- резистор R_3 номиналом 910 кОм – 50 шт.;
- конденсатор C емкостью 1 мкФ (обозначение: 105) – 1 шт.

Порядок выполнения работы

До измерения сопротивления резистора соединить, как показано на рисунке, перемычками резистор с контактными площадками мультиметра *CURRENT HI* (токовый вход положительной полярности, предназначенный для всех функциональных возможностей мультиметра, кроме измерения напряжения) и *CURRENT LO* (вход отрицательной полярности, предназначенный для всех функциональных возможностей мультиметра, кроме измерения напряжения).



Лабораторная работа № 3

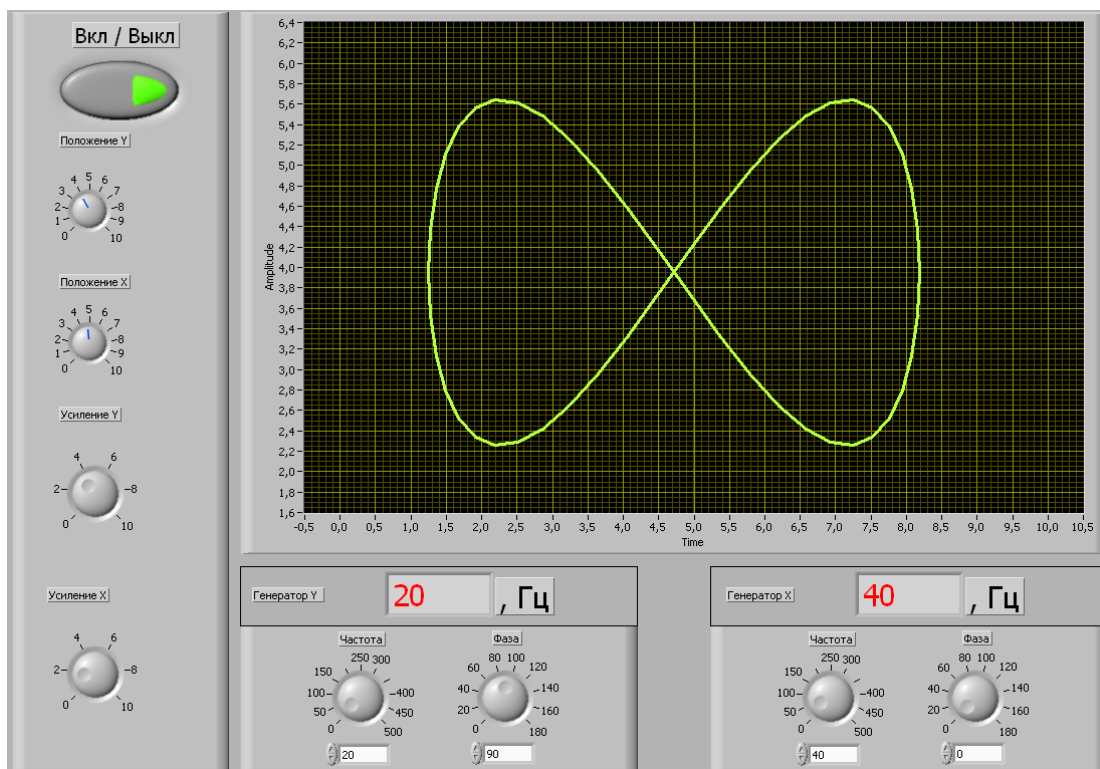
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО ОСЦИЛЛОГРАФА NI ELVIS

Цель работы: изучить устройство, работу электронного осциллографа и генератора звуковой частоты и их применение к исследованию электрических колебаний звуковой частоты на примере виртуального осциллографа NI ELVIS.

Оборудование: установка NI ELVIS, персональный компьютер, программное обеспечение виртуального осциллографа.

Порядок выполнения работы

Запустить виртуальный осциллограф *NI ELVIS* (проект осциллографа в *LabVIEW* изображен на рисунке). Подбирая коэффициент развертки, коэффициент вертикального отклонения, измерить амплитуду, период сигнала.



СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пуанкаре, А.** О науке / А. Пуанкаре. – М. : Наука, 1990. – 736 с.
2. **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 607 с.
3. **Савельев, И. В.** Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – 432 с.
4. **Савельев, И. В.** Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 496 с.
5. **Трофимова, Т. И.** Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш.шк., 1990. – 470 с.
6. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики : в 4 т. Т. 1 / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1974. – 519с.
7. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики : в 4 т. Т. 2 / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1975. – 551 с.
8. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики : в 4 т. Т. 3 / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1977. – 687 с.
9. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики : в 4 т. Т. 4 / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 751 с.
10. **Калашников, Э. Г.** Электричество / Э. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 590 с.
11. **Иродов, И. Е.** Основные законы электромагнетизма / И. Е. Иродов. – М. : Высш. шк., 1983. – 279 с.
12. **Ландсберг, Г. С.** Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976. – 926 с.
13. **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1979. – 351 с.
14. **Савельев, И. В.** Сборник вопросов и задач по общей физике / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – 271 с.
15. **Чертов, А. Г.** Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – М. : Высш. шк., 1981. – 496 с.
16. **Иродов, И. Е.** Сборник задач по общей физике / И. Е. Иродов, И. В. Савельев, О. И. Замша. – М. : Наука, 1975. – 319 с.
17. Сборник качественных вопросов и задач по общей физике / Е. И. Бабаджан [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 396 с.
18. **Чертов, А. Г.** Физика : методич. указания и контрол. задания для студентов-заочников / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1987. – 209 с.
19. **Фирганг, Е. В.** Руководство к решению задач по курсу физики / Е. В. Фирганг. – М. : Высш. шк., 1978. – 351 с.

20. **Новодворская, Е. М.** Методика проведения упражнений по физике / Е. М. Новодворская, Э. М. Дмитриев. – М. : Высш. шк., 1981. – 318 с.

21. Методические указания для самостоятельной работы студентов по физике : Механика. Молекулярная физика и термодинамика / сост. Е. В. Орлик [и др.] ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1986. – 48 с.

22. Методические указания для самостоятельной работы студентов по физике : Электричество и оптика / сост. А. Ф. Галкин [и др.] ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1991. – 72 с.

23. Физика. Программа, методические указания и задачи для студентов – заочников (с примерами решения) ; сост. А. Ф. Галкин [и др.] ; под ред. А. А. Кулиша. Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2002. – 128 с.

24. Физика. Методические указания к комплексу лабораторных работ по физике для студентов-заочников. Механика, молекулярная физика, электричество и магнетизм, колебания и волны, оптика ; сост. А. Ф. Галкин [и др.] ; под ред. А. А. Кулиша ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2004. – 107с.

25. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.

26. Методические указания к лабораторным работам по физике с обработкой результатов экспериментов на персональном компьютере / сост. О. Я. Бутковский [и др.]; под ред. В. С. Плешивцева ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1999. – 44 с.

27. Лабораторный практикум по физике / под ред. А. С. Ахматова. – М. : Высш. шк., 1980. – 326 с.

28. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л. Л. Гольдина. – М. : Наука, 1983. – 425 с.

29. **Каленков, С. Г.** Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломахо. – М. : Высш. шк., 1990. – 112 с.

30. Физический практикум. Электричество и оптика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1968. – 310 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Раздел 1. ИЗУЧЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	5
1.1. Методические указания к изучению теоретического материала	5
1.2. Программа	6
1.3. Вопросы, входящие в экзаменационные билеты	14
Раздел 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	22
2.1. Методические указания к решению задач по физике	22
2.2. Темы практических занятий	23
2.3. Примеры решения задач по физике	23
2.4. Расчетно-графические и контрольные работы	70
2.4.1. Методические рекомендации к выполнению расчетно-графических и контрольных работ	70
2.4.2. Задачи для расчетно-графических и контрольных работ	70
2.4.3. Контрольные задания	100
2.5. Тесты	104
Раздел 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	105
3.1. Введение к лабораторным работам	105
3.2. Элементарная обработка результатов физического эксперимента	105
3.3. Оформление отчета	115
3.4. Лабораторные работы. Раздел «МЕХАНИКА»	117
Лабораторная работа № 1-1. Исследование распределения результатов физических измерений	117
Лабораторная работа № 1-2. Определение плотности твердых тел пикнометром	120
Лабораторная работа № 1-3. Изучение динамики поступательного движения	122
Лабораторная работа № 1-5. Изучение динамики вращательного движения твердого тела	126
Лабораторная работа № 1-9. Определение модуля сдвига металлов методом крутильных колебаний	132
Лабораторная работа № 1-10. Определение модуля Юнга методом растяжения проволочных образцов	136
3.5. Лабораторные работы. Раздел «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»	140
Лабораторная работа № 2-2. Определение коэффициента вязкости жидкости и числа Рейнольдса методом падающего в жидкости шарика	140

Лабораторная работа № 2-3. Определение скорости звука в воздухе и показателя адиабаты воздуха методом стоячей волны.....	143
Лабораторная работа № 2-5. Определение коэффициента поверхностного натяжения воды.....	146
Лабораторная работа № 2-7. Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана – Дезорма.....	153
3.6. Лабораторные работы. Раздел «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ».....	157
Лабораторная работа № 3-1. Изучение электрического поля.....	159
Лабораторная работа № 3-3. Мостовой метод измерений....	164
Лабораторная работа № 3-8. Изучение явления электропроводности и определение удельного сопротивления металла.....	168
3.7. Лабораторные работы. Раздел «КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ».....	172
Лабораторная работа № 4-2. Измерение индуктивности катушки по ее реактивному и активному сопротивлениям.....	172
Лабораторная работа № 4-4. Исследование электрических колебаний звуковой частоты с помощью электронного осциллографа.....	176
Лабораторная работа № 4-7. Получение электромагнитных волн и изучение их свойств.....	179
3.8. Лабораторные работы. Раздел «ОПТИКА».....	183
Лабораторная работа № 5-3. Определение длины световой волны с помощью колец Ньютона	183
Лабораторная работа № 5-4. Изучение интерференционных полос равного наклона с помощью газового лазера.....	189
Лабораторная работа № 5-5. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки.....	193
Лабораторная работа № 5-7. Определение концентрации растворов при помощи поляриметра.....	199
Лабораторная работа № 5-8. Изучение закона Малюса.....	203
Раздел 4. ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ).....	207
Методические указания к выполнению виртуальных лабораторных работ.....	207
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	211

ФИЗИКА

Методические указания к теоретическому материалу, практическим занятиям и заданиям, тестам, комплексу лабораторных работ для студентов дистанционной формы обучения

Составители:

КУЛИШ Александр Алексеевич
ГРУНСКАЯ Любовь Валентиновна

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессора В. В. Дорожков

Подписано в печать 30.04.13.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 12,56. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.