Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра технической физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

по физике для студентов-заочников
энергетических специальностей
и факультета информационных технологий
и робототехники

2-е издание

Минск 2005

УДК 53 (075.4)
ББК 22.3 я 73
М 54

Составители:
Л.А Сакевич, М.Б. Ржевский, А.Б. Тимофеев, О.И. Авсеевич,
А.А. Андрюшкевич, Н.Ф. Галякевич, З.М. Юдовин, Е.П. Трухан,
Л.Е. Сандригайло, Л.Ф. Гладченко

Рецензенты:
Г.Н. Блинков, А.А. Баранов

В методических указаниях приведены основные требования к выполнению и оформлению контрольных работ, рекомендуемая литература, учебная программа курса общей физики и пояснения к ней; даны основные формулы по всем разделам курса общей физики, примеры решения задач и задания для выполнения контрольных работ. Издание содержит примеры решения задач и задания по основам радиационной физики и, кроме того, подготовлено с учетом специализации студентов.

За основу взяты «Методические указания и контрольные задания по физике для студентов-заочников энергетических специальностей», изданные в 1992 г.

ISBN 985-479-364-8

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО КУРСУ ФИЗИКИ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ЗАОЧНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ И ВУЗОВ

Введение

Предмет физики. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Связь физики с другими науками. Физика как культура моделированная. Компьютеры в современной физике. Роль физики в становлении инженера. Общая структура курса физики. Размерность физических величин. Основные единицы системы СИ.

1. Физические основы классической механики

Предмет механики. Классическая механика. Квантовая механика. Релятивистская механика. Физические модели: материальная точка, система материальных точек, абсолютно твердое тело, сплошная среда, пространство и время.

Механическое движение как простейшая форма движения материи. Представления о свойствах пространства и времени, лежащие в основе классической (ньютоновской) механики. Элементы кинематики материальной точки. Скорость и ускорение точки как производные радиуса-вектора по времени. Нормальное и тангенциальное ускорение.

Динамика материальной точки и поступательного движения твердого тела. Закон инерции и инерциальные системы отсчета. Законы динамики материальной точки и системы материальных точек. Внешние и внутренние силы. Центр масс (центр инерции) механической системы и закон его движения. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы и его связь с однородностью пространства.

Энергия как универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Работа переменной силы. Реактивное движение. Кинетическая энергия механической системы и ее связь с работой внешних и внутренних сил, приложенных к системе.

Поле как форма материи, осуществляющая силовое взаимодействие между частицами вещества. Консервативные и неконсервативные системы. Потенциальная энергия материальной точки во внешнем силовом поле, ее связь с силой, действующей на материальную точку. Понятие о градиенте скалярной функции координат. Поле центральных сил. Потенциальная энергия системы. Закон сохранения механической энергии и его связь с однородностью времени. Закон сохранения и превращения энергии как проявление неуничтожимости материи и ее движения. Применение законов сохранения к столкновению упругих и неупругих тел.

Элементы вращательного движения. Угловая скорость и угловое ускорение, связь с линейными скоростями и ускорениями точек вращающегося тела. Момент силы и момент импульса механической системы. Момент силы относительно оси. Момент импульса тела относительно неподвижной оси вращения. Момент инерции тела относительно оси. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. Кинетическая энергия вращающегося тела. Закон сохранения момента импульса и его связь с изотропностью пространства.

Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции. Элементы механики сплошных сред. Общие свойства жидкостей и газов. Идеальная и вязкая жидкости. Стационарное движение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли. Гидродинамика вязкой жидкости. Формула Пуазейля. Формула Стокса. Упругие напряжения. Закон Гука. Растяжение и сжатие стержней.

2. Элементы специальной (частной) теории относительности

Преобразования Галилея. Механический принцип относительности. Постулаты специальной теории относительности. Преобразование Лоренца. Относительность длин и промежутков времени. Интервал между событиями и его инвариантность по отношению к выбору инерциальной системы отсчета как проявление взаимосвязи пространства и времени. Релятивистский закон сложения скоростей. Релятивистский импульс. Основной закон релятивистской динамики материальной точки. Релятивистское выражение для кинетической энергии. Взаимосвязь массы и энергии. Энергия связи системы. Соотношение между полной энергией и импульсом частицы. Границы применимости классической (ньютоновской) механики.

3. Механические колебания и волны в упругих средах

Понятие о колебательных процессах. Параметрические колебания и автоколебания. Единый подход к колебаниям различной физической природы. Гармонические механические колебания. Кинематические характеристики гармонических колебаний. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Комплексная форма представления колебаний. Гармонический осциллятор. Пружинный, физический и математический маятники. Энергия гармонических колебаний. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность. Апериодический процесс. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Амплитуда смещения и фаза вынужденных колебаний. Понятие о резонансе. Фурье-разложение. Физический смысл спектрального разложения. Модулированные колебания. Спектр амплитудно-модулированного колебания.

Волновые процессы. Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Синусоидальные (гармонические) волны. Уравнение бегущей волны. Длина волны и волновое число. Волновое уравнение. Фазовая скорость и дисперсия волн. Энергия волны. Принцип суперпозиции волн и границы его применимости. Волновой пакет. Групповая скорость. Когерентность.

Интерференция волн. Образование стоячих волн. Уравнение стоячей волны и его анализ. Эффект Доплера.

4. Основы молекулярной физики и термодинамики

Статистический и термодинамический методы исследования. Термодинамические параметры. Равновесные состояния и процессы, их изображение на термодинамических диаграммах. Вывод уравнения молекулярно-кинетической теории идеальных газов для давления и его сравнение с уравнением Клапейрона – Менделеева. Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетическое толкование термодинамической температуры. Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул. Внутренняя энергия идеального газа. Работа газа при изменении его объема. Количество теплоты. Теплоемкость. Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам и адиабатному процессу идеального газа. Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса. Классическая молекулярно-кинетическая теория теплоемкостей идеальных газов и ее ограниченность. Границы применимости закона равнораспределения энергии и понятие о квантовании энергии вращения и колебания молекул.

Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по скоростям и энергиям теплового движения. Барометрическая формула. Закон Больцмана для распределения частиц во внешнем потенциальном поле. Распределение Гиббса. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул. Время релаксации. Явления переноса в термодинамически неравновесных системах. Опытные законы диффузии, теплопроводности и внутреннего трения. Молекулярно-кинетическая теория этих явлений.

Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл). Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно и его КПД для идеального газа. Второе начало термодинамики. Независимость КПД цикла Карно от природы рабочего тела. Энтропия. Энтропия идеального газа. Принцип возрастания энтропии. Статистическое толкование второго начала термодинамики. Критика идеалистического толкования второго начала термодинамики. Термодинамические потенциалы и условия равновесия.

Отступления от законов идеальных газов. Реальные газы. Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Эффективный диаметр молекул. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Сравнение изотерм Ван-дер-Ваальса с экспериментальными. Внутренняя энергия реального газа. Фазовые переходы I и II рода. Критическое состояние. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Тройная точка. Фазовые диаграммы. Внутренняя энергия реального газа. Особенности жидкого и твердого состояний вещества. Строение кристаллов. Точечные дефекты в кристаллах. Дислокация и пластичность.

5. Электростатика

Закон сохранения электрического заряда. Электрическое поле. Основные характеристики электрического поля – напряженность и потенциал. Напряженность как градиент потенциала. Расчет электростатических полей методом суперпозиции. Поток вектора напряженности (электрического смещения). Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме. Применение теоремы Остроградского – Гаусса к расчету поля. Электрическое поле в веществе. Проводники в электрическом поле. Электростатическая защита. Свободные и связанные заряды в диэлектриках. Типы диэлектриков. Электронная и ориентационная поляризация. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость вещества. Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость среды. Вычисление напряженности поля в диэлектрике. Емкость конденсаторов различной геометрической конфигурации. Энергия взаимодействия электрических зарядов, заряженных проводников, электростатического поля. Объемная плотность энергии электростатического поля. Сегнетоэлектрики.

6. Постоянный электрический ток

Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования. Разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение. Сторонние силы. ЭДС гальванического элемента. Закон Ома для участка цепи с гальваническим элементом. Классическая электронная теория электропроводности металлов и ее опытные обоснования. Вывод закона Ома и Джоуля – Ленца в дифференциальной форме из электронных представлений. Закон Видемана – Франца. Закон Ома и Джоуля – Ленца в интегральной форме. Затруднения классической теории электропроводности металлов. Границы применимости закона Ома. Правила Кирхгофа. Ток в газах. Плазма. Плазменная чистота, дебаевская длина, электропроводность плазмы. Работа выхода электронов из металла. Термоэлектронная эмиссия.

7. Электромагнетизм

Магнитное поле. Магнитная индукция. Действие магнитного поля на ток. Закон Ампера. Единица силы тока – ампер и ее определение.

Магнитное поле тока. Закон Био – Савара – Лапласа и его применение к расчету магнитного поля. Магнитное поле прямолинейного проводника с током. Магнитное поле кругового тока. Магнитный момент витка с током. Вихревой характер магнитного поля. Закон полного тока (циркуляция вектора магнитной индукции) для магнитного поля в вакууме и его применение к расчету магнитного поля тороида и длинного соленоида. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Принцип действия циклических ускорителей заряженных частиц. Эффект Холла. МГД-генератор. Контур с током в магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку с током в магнитном поле. Магнитный поток. Теорема Остроградского – Гаусса. Работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции (опыты Фарадея). Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции и его вывод из закона сохранения энергии. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при замыкании и размыкании цепи. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Энергия системы проводников с током. Объемная плотность энергии магнитного поля.

Магнитное поле в веществе. Магнитные моменты атомов. Типы магнетиков. Намагниченность. Микро- и макротоки. Элементарная теория диа- и парамагнетизма. Магнитная восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры. Законы полного тока для магнитного поля в веществе. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики. Опыты Столетова. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Домены. Спиновая природа ферромагнетизма.

Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Ток смещения. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в интегральной и дифференциальной форме.

8. Электромагнитные колебания и волны

Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний. Электрический колебательный контур. Энергия электромагнитных колебаний. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний и его решение. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Случай резонанса. Плоские электромагнитные волны. Дифференциальное уравнение плоской электромагнитной волны. Основные свойства электромагнитных волн. Плоская монохроматическая волна. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии. Вектор Умова – Пойтинга. Излучение диполя.

9. Волновая оптика

Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на одной щели и дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа – Брэгга. Исследование структуры кристаллов. Принцип голографии. Применение голографии. Дисперсия света. Области нормальной и аномальной дисперсии. Электронная теория дисперсии света. Поглощение света. Эффект Доплера. Излучение Вавилова – Черенкова. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Поляроиды и поляризационные призмы. Закон Малюса. Электрооптические и магнитооптические явления. Жидкие кристаллы. Поведение в электрическом и магнитном полях. Применение жидких кристаллов.

10. Квантовая природа излучения

Тепловое излучение. Черное тело. Проблемы излучения черного тела. Закон Кирхгофа. Закон Стефана – Больцмана. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Квантовая гипотеза и формула Планка. Оптическая пирометрия. Внешний фотоэффект и его законы. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Давление света. Опыты Лебедева. Квантовое и волновое объяснение давления света. Эффект Комптона и его теория. Диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

11. Элементы атомной физики и квантовой механики

Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма свойств вещества. Формула де Бройля. Соотношение неопределенностей как проявление корпускулярно-волнового дуализма свойств материи. Волновая функция и ее статистический смысл. Ограниченность механического детерминизма. Принцип причинности в квантовой механике. Стационарные состояния. Уравнение Шредингера для стационарных состояний. Свободная частица. Туннельный эффект. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме. Квантование энергии и импульса частицы. Понятие о линейном гармоническом осцилляторе. Атом водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Понятие об энергетических уровнях молекул. Спектры атомов и молекул. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение. Принцип работы квантового генератора. Метод трех уровней. Первые лазеры. Применение лазеров.

12. Элементы квантовой статистики и физики твердого тела

Фазовое пространство. Элементарная ячейка. Плотность состояний. Понятие о квантовой статике Бозе – Эйнштейна. Фотонный и фононный газы. Распределение фононов по энергиям. Теплоемкость кристаллической решетки. Сверхтекучесть. Понятие о квантовой статике Ферми – Дирака. Распределение электронов проводимости в металле по энергиям при абсолютном нуле температуры. Энергия Ферми. Влияние температуры на распределение электронов. Уровень Ферми. Внутренняя энергия и теплоемкость электронного газа в металле. Электропроводимость металлов. Сверхпроводимость. Магнитные свойства сверхпроводника. Высокотемпературная сверхпроводимость. Эффекты Джозефсона.

Энергетические зоны в кристаллах. Распределение электронов по энергетическим зонам. Валентная зона и зона проводимости. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Собственная проводимость полупроводников. Квазичастицы – электроны проводимости и дырки. Эффективная масса электронов в кристалле. Примесная проводимость полупроводников. Контактные явления. Контакт электронного и дырочного полупроводника (p-n-переход) и его вольтамперная характеристика. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Люминесценция твердых тел.

13. Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Момент импульса ядра и его магнитный момент. Состав ядра. Работы Иваненко и Гейзенберга. Нуклоны. Взаимодействие нуклонов и понятие о свойствах и природе ядерных сил. Дефект массы и энергия связи ядра. Закономерности и происхождение альфа-, бета- и гамма-излучений атомных ядер. Ядерные реакции и законы сохранения. Реакция деления ядер. Цепная реакция деления. Ядерный реактор. Понятие о ядерной энергетике. Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций. Эффект Мессбауэра и его применение. Элементарные частицы. Их классификация и взаимная превращаемость. Четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные. Понятие об основных проблемах современной физики и астрофизики. Современная физическая картина мира.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

Необходимо хорошо усвоить вопросы, изложенные в разделе “Введение”. Изучать основы классической механики надо исходя из представлений современной физики, в которой основные понятия классической механики не утратили своего значения, а лишь получили дальнейшее развитие, обобщение и критическую оценку с точки зрения их применения. Следует помнить, что механика — это наука о простейших формах движения материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между телами. Движение всегда существует в пространстве и во времени. Надо помнить, что пространство и время являются основными формами существования материи. Предметом классической механики является движение макроскопических материальных тел, совершаемое со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света в вакууме. Движение частиц со скоростями порядка скорости света рассматривается в теории относительности, а движение микрочастиц изучается в квантовой механике.

Контрольная работа по разделам "Механика", "Молекулярная физика и термодинамика" построена так, что позволяет проверить знания студентов по ключевым вопросам этих дисциплин. Решая задачи по кинематике, в которых необходимо использовать математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления, студент должен научиться определять мгновенные скорость и ускорение по заданной зависимости координаты от времени и решать обратные задачи.

Задачи на динамику материальной точки и поступательного движения твердого тела охватывают такие вопросы, как закон сохранения импульса (количества движения); работу силы и ее выражение через криволинейный интеграл; связь кинетической энергии механической системы с работой сил, приложенных к этой системе; закон сохранения механической энергии. Тщательного изучения и понимания требуют вопросы о поле как форме материи, осуществляющей взаимодействие между частицами вещества или телами; о потенциальной энергии материальной точки во внешнем поле и потенциальной энергии механической системы.

В задачах на кинематику и динамику вращательного движения твердого тела главное внимание уделяется изучению соотношений между линейными и угловыми характеристиками, понятию момента силы, момента инерции тела, законам сохранения количества движения, моменту количества движения и механической энергии.

Необходимо уяснить, что существует два качественно различных и взаимодополняющих метода исследования физических свойств микроскопических систем – статистический (молекулярно-кинетический) и термодинамический. Молекулярно-кинетический метод исследования лежит в основе молекулярной физики, термодинамический – в основе термодинамики. Молекулярно-кинетическая теория является важнейшей теорией, которая позволяет с единой точки зрения рассмотреть самые различные явления во всех состояниях вещества, вскрыть физическую сущность этих явлений и теоретическим путем вывести многочисленные закономерности, открытые экспериментально и имеющие большое практическое значение.

При изучении молекулярно-кинетической теории следует уяснить, что свойства огромной совокупности молекул отличны от свойств каждой отдельной молекулы, а свойства микроскопической системы, в конечном счете, определяются свойствами частиц системы, особенностями их движения и средними значениями кинематических характеристик частиц, т.е. их скоростей, энергии и т. д.

В отличие от молекулярно-кинетической теории термодинамика не изучает конкретно молекулярные взаимодействия, происходящие с отдельными атомами и молекулами, а рассматривает взаимопревращения и связь различных типов энергии, теплоты и работы. Термодинамика базируется на двух опытных законах (началах), которые позволяют описывать физические явления, связанные с превращением энергии макроскопическим путем.

При изучении основ термодинамики студент должен четко усвоить такие понятия, как термодинамическая система, термодинамические параметры (параметры состояния), равновесное состояние, уравнение состояния, термодинамический процесс, внутренняя энергия, энтропия и т.д.

В задачах на тему "Основы молекулярно-кинетической теории" внимание уделено таким вопросам программы, как уравнение Клапейрона – Менделеева, уравнения молекулярно-кинетической теории, средние кинетические энергии поступательного и вращательного движения молекул, средняя длина свободного пробега и среднее число соударений.

Задачи по теме "Основы термодинамики" охватывают такие важные соотношения и понятия, как первое начало термодинамики, внутренняя энергия, работа при различных изопроцессах и адиабатном процессе. Включены также задачи, которые позволяют изучить и понять такие вопросы, как цикл Карно, второе начало термодинамики и энтропия, которая в отличие от количества теплоты является функцией состояния.

В контрольной работе, помогающей проверить знания по разделу "Электростатика. Постоянный ток", содержатся задачи на определение напряженности поля и разности потенциалов, расчет простейших электрических полей с помощью принципа суперпозиции, определение электроемкости и энергии поля конденсаторов, применение законов Ома и Джоуля – Ленца.

Особое внимание при изучении электростатики следует обратить на закон сохранения электрического заряда, инвариантность его в теории относительности на силовую и энергетическую характеристики поля (напряженность, потенциал) и связь между ними. Необходимо уметь применять теорему Остроградского – Гаусса для вычисления напряженности электрических полей, уяснить такие понятия, как поток и циркуляция вектора напряженности поля.

При изучении электрического поля в диэлектриках следует представлять механизм поляризации полярных и неполярных диэлектриков и преимущество вектора электрического смещения перед вектором напряженности для описания электрического поля в неоднородных диэлектриках.

При изучении вопроса об энергии заряженных проводников и конденсаторов необходимо обратить внимание, что в рамках электростатики нельзя однозначно решать вопрос о локализации этой энергии. С равным правом можно считать, что энергией обладают как заряженные проводники, так и создаваемое ими электрическое поле.

Изучение темы “Постоянный электрический ток” следует начать с классической электронной теории проводимости металлов; на ее основе рассмотреть законы Ома и Джоуля – Ленца; четко разграничить такие понятия, как разность потенциалов, электродвижущая сила и электрическое напряжение.

Электрические и магнитные явления связаны с особой формой существования материи – электрическими и магнитными полями, с их взаимодействием. Электромагнитные взаимодействия не только объясняют все электромагнитные явления, но и обеспечивают силы, обусловливающие существование вещества на атомном и молекулярном уровнях как целого. Важность теории электромагнитного поля связана с тем, что она включает в себя всю оптику, так как свет представляет собой электромагнитное излучение. Основой теории электромагнитного поля является теория Максвелла. Уравнения Максвелла установили тесную связь между электрическими и магнитными явлениями, которые раньше рассматривались как независимые. Максвелл сформулировал такое важнейшее понятие физики, как электромагнитное поле.

Необходимо усвоить закон Ампера, знать и уметь применять закон Био – Савара – Лапласа для расчета магнитной индукции или напряженности магнитного поля прямолинейного и кругового токов, а также закон полного тока (циркуляции вектора магнитной индукции) для расчета магнитного поля тороида и длинного соленоида. При изучении вопросов, связанных с действием магнитного поля на движущиеся заряды, нужно уметь применять формулу силы Лоренца, определять направление движения заряженных частиц в магнитном поле, представлять себе принцип работы циклических ускорителей заряженных частиц, определять работу перемещения проводника и контура с током в магнитном поле.

При изучении явления электромагнитной индукции необходимо усвоить, что механизм возникновения ЭДС индукции имеет электронный характер. Изучив основной закон электромагнитной индукции Фарадея – Максвелла, надо научиться на его основе выводить и применять для расчетов формулы ЭДС индукции, энергии магнитного поля.

Изучение магнитных свойств веществ, в основном, носит описательный характер. При этом необходимо уяснить, что, исходя из выражения циркуляции вектора магнитной индукции, магнитное поле в отличие от электрического является вихревым.

При изучении темы "Колебания и волны" следует параллельно рассмотреть механические и электромагнитные колебания, что способствует выработке единого подхода к колебаниям различной физической природы. Здесь следует четко уяснить понятия фазы, амплитуды, частоты, периода колебаний и там, где это необходимо, использовать графический метод представления гармонических колебаний. Нужно уяснить, что любые колебания линейной системы всегда можно представить в виде суперпозиции одновременно совершающихся гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и начальными фазами.

При изучении электромагнитных волн следует ясно представлять физический смысл уравнений Максвелла (в интегральной форме) и, опираясь на них, рассмотреть свойства этих волн. Нужно четко представлять, что переменные электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, поддерживают друг друга и могут существовать в виде электромагнитной волны. Другими словами, электромагнитная волна – это распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. Под энергией электромагнитного поля следует подразумевать сумму энергий электрического и магнитного полей. Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является колеблющийся электрический диполь. Следует помнить, что если диполь совершает гармонические колебания, он излучает монохроматическую волну.

В контрольной работе, помогающей проверить знания по разделу "Электромагнетизм", содержатся задачи на применение закона Био – Савара – Лапласа для расчета магнитной индукции (или напряженности) магнитного поля, создаваемого проводниками с током различной конфигурации; на применение принципа суперпозиции при определении индукции или напряженности простейших полей; на определение траектории движения заряженной частицы, ее заряда и силы, действующей на движущуюся частицу в магнитном поле; на вычисление работы, совершаемой силами как при движении прямолинейного проводника с током, так и при вращении контура с током различной конфигурации в магнитном поле; на нахождение энергии и объемной плотности энергии магнитного поля соленоида.

В настоящее время волновая оптика является частью общего учения о распространении волн. При изучении явлений интерференции, объясняемых с позиций волновой природы света, необходимо обратить внимание на общность этих явлений для волн любой природы. Но световые волны имеют специфические особенности – когерентность, монохроматичность, – которые обусловлены конечной длительностью свечения отдельного атома.

При изучении интерференции особое внимание следует обратить на такие вопросы, как цвета тонких пленок, полосы равной толщины и равного наклона. Следует помнить, что при интерференции света имеет место суперпозиция, связанная с перераспределением энергии, а не со взаимодействием волн.

Рассматривая явление дифракции, необходимо уяснить метод зон Френеля, уметь пользоваться графическим методом сложения амплитуд, что будет способствовать пониманию дифракции на одной щели, дифракционной решетке. Кроме того, необходимо изучить дифракцию на пространственной решетке, уметь пользоваться формулой

Вульфа – Брэггов, являющейся основной в рентгеноструктурном анализе, имеющем важнейшее практическое применение.

Изучение явлений интерференции и дифракции света должно способствовать, с одной стороны, пониманию физических основ голографии, а с другой, – основ волновой (квантовой) механики и физики твердого тела.

Поперечность световых волн была экспериментально установлена при изучении явления поляризации света, которое имеет большое практическое значение. При изучении этого явления особое внимание следует обратить на способы получения поляризованного света, применение законов Брюстера, Малюса, явление вращения плоскости поляризации в кристаллах и растворах, эффект Керра.

Изучая явление дисперсии света, необходимо уяснить сущность электронной теории этого явления, отличие нормальной дисперсии от аномальной.

Необходимо четко представлять такие понятия, как фазовая и групповая скорости, знать связь между ними и показать их равенство при отсутствии дисперсии. Следует представлять, что при движении заряженных частиц в веществе в том случае, когда скорость их движения превышает фазовую скорость световых волн в этой среде, возникает излучение Вавилова – Черенкова, которое нужно рассматривать как классическое явление.

Переход от классической физики к квантовой связан с проблемой теплового излучения и, в частности, с вопросом распределения энергии по частотам в спектре черного тела. Изучая тему "Квантовая природа излучения", необходимо знать гипотезу Планка о квантовании энергии осцилляторов, уяснить, что на основании формулы Планка могут быть получены законы Стефана – Больцмана и Вина.

Развитие гипотезы Планка привело к созданию представлений о квантовых свойствах света. Кванты света получили название фотонов. С позиции квантовой теории света объясняются такие явления, как фотоэлектрический эффект и эффект Комптона. При изучении фотоэффекта следует знать формулу Эйнштейна и на ее основании уметь объяснить закономерности, установленные Столетовым.

Рассматривая эффект Комптона, необходимо обратить внимание на универсальный характер законов сохранения энергии, которые оказываются справедливыми в каждом отдельном акте взаимодействия фотона с электроном.

Изучая световое давление, важно понять, что это явление может быть объяснено как на основе волновых представлений о свете, так и с точки зрения квантовой теории.

В итоге изучения этого раздела должно сформироваться представление, что электромагнитное излучение имеет двойственную корпускулярно-волновую природу – корпускулярно-волновой дуализм, который представляет собой проявление взаимосвязи двух основных форм материи – вещества и поля.

Изучение раздела "Элементы атомной и ядерной физики и физики твердого тела" следует начать с элементов квантовой механики; рассмотреть такие вопросы, как корпускулярно-волновой дуализм материи, гипотеза де Бройля; уяснить, что движение любой частицы, согласно этой гипотезе, всегда сопровождается волновым процессом. Исходя из соотношений неопределенностей Гейзенберга, определить границы применимости классической механики, понять, что из этих соотношений вытекает необходимость описания состояния микрочастиц с помощью волновой функции; обратить внимание на ее статистический смысл. Целесообразно рассмотреть применение уравнения Шредингера к стационарным состояниям (прямоугольная потенциальная яма бесконечной глубины). Следует знать правила квантования энергии, орбитального момента электрона импульса в атоме водорода и выяснить смысл квантовых чисел. Необходимо обратить внимание на физический смысл спинового числа и принцип запрета Паули, на основе которого рассмотреть распределение электронов в атоме по состояниям.

Необходимо уделить внимание элементам теории кристаллической решетки, элементам зонной теории твердых тел, полупроводникам, проводникам (металлам). Рассматривая эти вопросы, надо понять характер теплового движения в твердых телах, дебаевскую теорию теплоемкости, распределение электронов по энергиям Т = 0 и Т > 0 К; иметь качественное представление о сверхпроводимости, в том числе высокотемпературной сверхпроводимости. Выяснить различия между металлами, диэлектриками и полупроводниками, рассмотреть собственную и примесную проводимости полупроводников и вольт-амперную характеристику p-n-перехода. Необходимо знать физические основы работы лазеров и их применение.

Переходя к изучению элементов физики атомного ядра и элементарных частиц, надо хорошо представлять себе состав атомного ядра и его характеристики: массу, линейные размеры, момент импульса, магнитный момент, дефект массы ядра, энергию и удельную энергию его связи. Рассматривая состав ядра и взаимодействие в нем нуклонов, нужно знать свойства ядерных сил и обратить внимание на их обменную природу.

В процессе изучения радиоактивного распада ядер важно понять дискретный характер энергетического спектра α-частиц и γ-излучения, свидетельствующий о квантовании энергии ядер; понять закономерности β-распада, связанного с законами сохранения энергии.

Важно понять, что во всех ядерных реакциях выполняются законы сохранения: энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда, массы (массового числа). Особое внимание необходимо уделить реакциям синтеза легких и деления тяжелых ядер, вопросам ядерной энергетики и проблемам управления термоядерными реакциями.

В предлагаемых контрольных работах содержатся задачи, которые позволяют проверить знания студентов по разделу "Волновая оптика и квантовая природа излучения", задачи на интерференцию в тонких пленках. Тема "Дифракция света" представлена задачами: дифракция в параллельных лучах на одной щели, на плоской и пространственной дифракционной решетках.

Задачи по теме "Поляризация света" охватывают такие вопросы, как применение закона Брюстера, Малюса, определение степени поляризации, вращение плоскости поляризации в растворах и кристаллах.

Задачи по теме "Квантовая природа излучения" включают законы теплового излучения, фотоэффект, эффект Комптона, давление света.

Ряд задач включает такие вопросы, как определение длины волны де Бройля, движущихся частиц, соотношения неопределенностей Гейзенберга. Имеются также задачи, в которых определяются удельная и молярная теплоемкости твердых тел по теории Дебая и т.д.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

За время изучения курса общей физики студент-заочник должен представить в учебное заведение несколько контрольных работ.

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие правила:

1. На титульном листе необходимо указывать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес.

2. Контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента.

3. Задачу своего варианта надо переписывать полностью, а заданные физические величины выписать отдельно, при этом все числовые величины должны быть переведены в одну систему единиц (СИ).

4. Для пояснения решения задачи следует, где это нужно, аккуратно сделать чертеж.

5. Решение задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями.

6. В пояснениях к задаче необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи.

7. При получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, надо приводить ее вывод.

8. Решение задачи рекомендуется сначала делать в общем виде, т.е. только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул обозначения.

9. Вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу.

10. Необходимо проверять единицы полученных величин по расчетной формуле, тем самым подтвердив ее правильность.

11. Константы физических величин и другие справочные данные выбираются из таблиц (см. "Задачник по физике" А.Г. Чертова, А.А. Воробьева).

12. При вычислениях следует, по возможности, использовать микрокалькулятор; точность расчета определяется числом значащих исходных данных.

13. В контрольной работе следует указать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также выполненные не по своему варианту, зачитываться не будут.

При отсылке работы на повторное рецензирование следует обязательно представлять ее с первой рецензией.

Контрольные работы необходимо высылать для рецензирования до начала экзаменационной сессии.

Во время экзаменационно-лабораторных сессий проводятся лабораторные работы. Цель лабораторного практикума – не только изучить те или иные физические явления, убедиться в правильности теоретических выводов, приобрести соответствующие навыки в обращении с физическими приборами, но и более глубоко овладеть теоретическим материалом.

На экзаменах и зачетах, в первую очередь, выясняется усвоение основных теоретических положений программы и умение творчески применять полученные знания к решению практических задач. Физическая сущность явлений, законов, процессов должна излагаться четко и достаточно подробно. Только при выполнении этих условий знания по курсу физики могут быть признаны удовлетворительными.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Примеры решения задач

Задача 1.1

Уравнение движения материальной точки вдоль оси имеет вид

$$X = A + Bt + Ct^3,$$

где $A = 2$ м; $B = 1$ м/с; $C = -0{,}5$ м/с^3. Найти координату, скорость и ускорение точки в момент времени 2 с.

Дано:

$X = A + Bt + Ct^3$;
$A = 2$ м;
$B = 1$ м/с;
$C = 0{,}5$ м/с^3;
$t = 2$ с.

$X = ?$
$v = ?$
$a = ?$

Решение

Координату X найдем, подставив в уравнение движения числовые значения коэффициентов A, B, C и времени t:

$$X = (2 + 1 \cdot 2 - 0{,}5 \cdot 2^2)\ \text{м} = 0\,.$$

Мгновенная скорость есть первая производная от координаты по времени:

$$\upsilon = \frac{dX}{dt} = B + 3Ct^2.$$

В момент времени $t = 2$ с

$$\upsilon = 1 - 3 \cdot 0{,}5 \cdot 2^3 = -5\ \text{м/с}.$$

Ускорение точки найдем, взяв первую производную от скорости по времени:

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = 6\,Ct.$$

В момент времени $t = 2$ с

$$a = 6(-0{,}5) \cdot 2\ \text{м/с}^2 = -6\ \text{м/с}^2.$$

Задача 1.2

Тело вращается вокруг неподвижной оси по закону $\varphi = A+Bt+Ct^2$, где $A = 10$ рад; $B = 20$ рад/с; $C = -2$ рад/с^2. Найти полное ускорение точки, находящейся на расстоянии 0,1 м от оси вращения, для момента времени $t = 4$ с.

Дано:

$\varphi = A + Bt + Ct^2$;
A = 10 рад;
B = 20 рад/с;
C = -2 рад/с^2;
r = 0,1 м;
t = 4 с.

---

a = ?

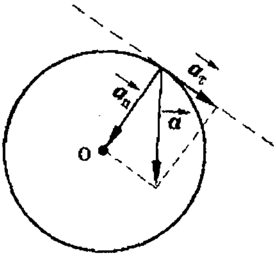

Рис. 1.1

Решение

Полное ускорение $\vec{a}$ точки, движущейся по кривой линии, может быть найдено как геометрическая сумма тангенциального ускорения $\vec{a}_\tau$, направленного по касательной траектории, и нормального ускорения $\vec{a}_n$, направленного к центру кривизны траектории (рис 1.1.):

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n .$$

Так как векторы $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$ взаимно перпендикулярны, абсолютное значение ускорения

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} . \qquad (1.1)$$

Тангенциальное и нормальное ускорения точки вращающегося тела выражаются формулами

$$a_\tau = \varepsilon r; \;\; a_n = \omega^2 r ,$$

где ω – угловая скорость тела;
ε – его угловое ускорение.

Подставляя выражение для $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$ в формулу (1.1), находим

$$a = \sqrt{\varepsilon^2 r^2 + \omega^4 r^2} = r\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4} . \qquad (1.2)$$

Угловую скорость ω найдем, взяв производную угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 2Ct .$$

В момент времени $t = 4$ с угловая скорость

$$\omega = [20 + 2(-2) \cdot 4] \text{ рад/с} = 4 \text{ рад/с}.$$

Угловое ускорение найдем, взяв первую производную от угловой скорости по времени:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = 2C = -4 \text{ рад/с}^2.$$

Это выражение не содержит времени; следовательно, угловое ускорение заданного движения постоянно.

Подставляя найденные значения ω и ε и заданное значение r в формулу (1.2), получим

$$a = 0{,}1\sqrt{(-4)^2 + 4^4} = 1{,}65 \text{ м/с}^2.$$

Задача 1.3

При выстреле из пружинного пистолета вертикально вверх пуля массой 20 г поднялась на высоту 5 м. Определить жесткость k пружины пистолета, если она была сжата на 10 см. Массой пружины пренебречь.

Дано:

$m = 20$ г $= 0{,}02$ кг;
$h = 5$ м;
$x = 10$ см $= 0{,}1$ м.

$k = ?$

Решение

Воспользуемся законом сохранения энергии, но прежде проследим за энергетическими превращениями, с которыми связан выстрел. При зарядке пистолета сжимается пружина и совершается работа A_1 в результате чего пружина приобретает потенциальную энергию Π_1. При выстреле потенциальная энергия пружины переходит в кинетическую энергию T_2 пули, а затем при подъеме ее на высоту h превращается в потенциальную энергию Π_2 пули. Если пренебречь потерями энергии в этой «цепочке» энергетических превращений, то на основе закона сохранения энергии можно записать:

$$A_1 = \Pi_2 . \qquad (1.3)$$

Найдем работу A_1. Сила F_1, сжимающая пружину, является переменной: в каждый момент она по направлению противоположна силе упругости F и численно равна ей. Сила упругости, возникающая в пружине при ее деформации, определяется по закону Гука:

$$F = kx,$$

где x – абсолютная деформация пружины.

Работу переменной силы вычислим как сумму элементарных работ. Элементарная работа при сжатии пружины на dx выразится формулой

$$dA_1 = F_1 dx .$$

Интегрируя в пределах от 0 до x, получим

$$A_1 = k\int_0^x x\,dx = \left\| \frac{1}{2}kx^2 \right|_0^x = \frac{1}{2}kx^2 . \qquad (1.4)$$

Потенциальная энергия пули на высоте h определится по формуле

$$\Pi_2 = mgh, \qquad (1.5)$$

где g – ускорение свободного падения.

Подставив в (1.3) выражение A_1 из (1.4) и Π_2 из (1.5), найдем

$$\frac{1}{2}kx^2 = mgh,$$

откуда

$$k = \frac{2mgh}{x^2}. \qquad (1.6)$$

Проверим, дает ли полученная формула единицу жесткости k. Для этого в правую часть формулы (1.6) вместо величин подставим их единицы:

$$[k] = \frac{[m][g][h]}{[x^2]} = \frac{1\ \text{кг} \cdot 1\ \text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 1\ \text{м}}{1\ \text{м}^2} = \frac{1\ \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}}{1\ \text{м}} = 1\ \text{Н/м}.$$

Убедившись, что полученная единица Н/м является единицей жесткости, подставим в формулу (1.6) значения величин и произведем вычисления:

$$k = \frac{2 \cdot 0{,}02 \cdot 9{,}81 \cdot 5}{(0{,}1)^2}\ \text{Н/м} = 196\ \text{Н/м}.$$

Задача 1.4

Через блок в виде сплошного диска, имеющего массу 80 г (рис. 1.2), перекинута тонкая гибкая нить, к концам которой подвешены грузы с массами 100 и 200 г. С каким ускорением будут двигаться грузы, если их предоставить самим себе? Трением и массой нити пренебречь.

Дано:

$m = 80$ г $= 0{,}08$ кг;
$m_1 = 100$ г $= 0{,}1$ кг;
$m_2 = 200$ г $= 0{,}2$ кг.

$a = ?$

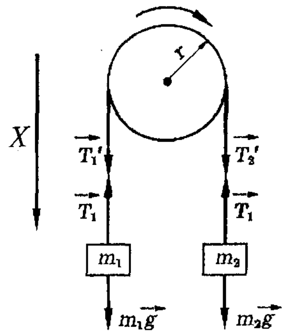

Рис. 1.2

Решение

Воспользуемся основными уравнениями динамики поступательного и вращательного движений. Для этого рассмотрим силы, действующие на каждый груз в отдельности и на блок. На первый груз действуют две силы: сила тяжести $m_1\vec{g}$ и сила упругости (сила натяжения нити) $\vec{T_1}$. Спроектируем эти силы на ось X, которую направим вертикально вниз, и напишем уравнение движения (2-й закон Ньютона):

$$m_1 g - T_1 = -m_1 a. \qquad (1.7)$$

Уравнение движения для второго груза запишется аналогично:

$$m_2 g - T_2 = -m_2 a. \qquad (1.8)$$

Под действием двух моментов сил $T_1 r$ и $T_2 r$ относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа, блок приобретает угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{a}{r}.$$

Согласно основному уравнению динамики вращательного движения,

$$T'_2 r - T'_1 r = J_z \varepsilon, \qquad (1.9)$$

где $J_z = \frac{1}{2} mr^2$ – момент инерции блока (сплошного диска) относительно оси z.

Согласно 3-му закону Ньютона, с учетом невесомости нити

$$T'_1 = T_1; \; T'_2 = T_2.$$

Воспользовавшись этим, подставим в уравнение (1.9) вместо T'_1 и T'_2 выражения T_1 и T_2, получив их предварительно из уравнений (1.7) и (1.8):

$$(m_2 g - m_2 a) \cdot r - (m_1 g + m_1 a) \cdot r = mr^2 a / (2r).$$

После сокращения на r и перегруппировки членов найдем

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1 + m/2} g. \qquad (1.10)$$

Формула (1.10) позволяет массы выразить в граммах, как они даны в условии задачи, а ускорение – в единицах СИ. После подстановки числовых значений в формулу (1.10) получим

$$a = \frac{(200 - 100)\ \text{г}}{(200 + 100 + 80/2)\ \text{г}} \cdot 9{,}81\ \text{м/с}^2 = 2{,}88\ \text{м/с}^2.$$

Задача 1.5

Платформа в виде сплошного диска радиусом 1,5 м и массой 180 кг вращается по инерции около вертикальной оси с частотой 10 об/мин. В центре платформы стоит человек массой 60 кг. Какую линейную скорость относительно пола помещения будет иметь человек, если он перейдет на край платформы?

Дано:

$R = 1{,}5$ м;
$m = 180$ кг;
$n = 10$ об/мин $= 1/6$ об/с.

$\upsilon = ?$

Решение

Платформа вращается по инерции. Следовательно, момент внешних сил относительно оси вращения, совпадающей с геометрической осью платформы, равен нулю. При этом условии момент импульса L_z системы платформа – человек остается постоянным:

$$L_z = J_z \omega = \text{const}, \qquad (1.11)$$

где J_z – момент инерции платформы с человеком относительно оси вращения;

ω – угловая скорость платформы.

Момент инерции системы равен сумме моментов инерции тел, входящих в состав системы, поэтому

$$J_z = J_1 + J_2,$$

где J_1 – момент инерции платформы;

J_2 – момент инерции человека.

С учетом этого равенства (1.11) примет вид

$$(J_1 + J_2)\omega = \text{const}$$

или

$$(J_1 + J_2)\omega = (J_1' + J_2')\omega', \qquad (1.12)$$

где значения моментов инерции J_1 и J_2 относятся к начальному состоянию системы, J_1', J_2' – к конечному. Момент инерции платформы относительно оси вращения Z при переходе человека не изменяется:

$$J_1 = J' = \frac{1}{2} m_1 R^2.$$

Момент инерции человека относительно той же оси будет изменяться. Если рассматривать человека как материальную точку, то его момент инерции J_2 в начальном положении (в центре платформы) можно считать равным нулю. В конечном положении (на краю платформы) момент инерции человека

$$J_2' = m_2 R^2.$$

Подставим в формулу (1.12) найденные выражения моментов инерции, а также выразим начальную угловую скорость ω вращения платформы с человеком через частоту вращения n ($\omega = 2\pi n$) и конечную угловую скорость ω' – через линейную скорость υ человека относительно пола $\omega' = \upsilon / R$:

$$\left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + 0\right) 2\pi n = \left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 R^2\right) \frac{\upsilon}{\mathrm{R}}.$$

После сокращения на R^2 и простых преобразований находим интересующую нас скорость:

$$\upsilon = 2\pi n R \cdot \frac{m_1}{m_1 + 2m_2}.$$

Подставим числовые значения физических величин в СИ и произведем вычисления:

$$\upsilon = 2 \cdot 3{,}14 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1{,}5 \cdot \frac{180}{180 + 2 \cdot 60} \text{ м/с} = 1 \text{ м/с}.$$

Задача 1.6

Ракета установлена на поверхности Земли для запуска в вертикальном направлении. При какой минимальной скорости υ_1, сообщенной ракете при запуске, она удалится от поверхности на расстояние, равное радиусу Земли ($R = 6{,}37 \cdot 10^6$ м)? Всеми силами, кроме силы гравитационного взаимодействия ракеты и Земли, пренебречь.

Дано:
$R = 6{,}37 \cdot 10^6$ м;
$\upsilon_1 = ?$

Решение

Со стороны Земли на ракету действует сила тяжести. При неработающем двигателе под действием силы тяжести механическая энергия ракеты изменяться не будет.

Следовательно,

$$T_1 + \Pi_1 = T_2 + \Pi_2, \tag{1.13}$$

где T_1, Π_1 и T_2, Π_2 – кинетическая и потенциальная энергия ракеты после выключения двигателя в начальном (у поверхности Земли) и конечном (на расстоянии, равном радиусу Земли) состояниях.

Согласно определению кинетической энергии,

$$T_1 = \frac{1}{2} m \upsilon_1^2. \tag{1.14}$$

Потенциальная энергия ракеты в начальном состоянии

$$\Pi_1 = \frac{-GmM}{R}. \tag{1.15}$$

По мере удаления ракеты от поверхности Земли ее потенциальная энергия возрастает, а кинетическая – убывает. В конечном состоянии кинетическая энергия T_2 станет равной нулю, а потенциальная достигает максимального значения:

$$\Pi_2 = \frac{-GmM}{2R}. \tag{1.16}$$

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия тел, бесконечно удаленных друг от друга, принимается равной нулю. Подставляя выражения T_1, $П_1$ и T_2, $П_2$ в (1.13), получаем

$$m\upsilon_1^2/2 - GmM/(2R) = -GmM/(2R),$$

откуда

$$\upsilon_1 = \sqrt{GM/R} = \sqrt{qR},$$

где $g = GM/R^2$ – ускорение свободного падения у поверхности Земли.

Подставим числовые значения величин и произведем вычисления:

$$\upsilon_1 = \sqrt{9{,}8 \cdot 6{,}37 \cdot 10^6} \text{ м/с} = 7{,}9 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Задача 1.7

Частица массой 0,01 кг совершает гармонические колебания с периодом 2 с. Полная энергия колеблющейся частицы – 0,1 мДж. Определить амплитуду A колебаний и наибольшее значение силы F_{max}, действующей на частицу.

Дано:

$T = 2$ с;
$E = 0{,}1$ мДж $= 1 \cdot 10^{-4}$ Дж;
$m = 0{,}01$ кг.

$A = ?$
$F_{\max} = ?$

Решение

Для определения амплитуды колебаний воспользуемся выражением полной энергии частицы

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2.$$

Подставив сюда выражение $\omega = \frac{2\pi}{T}$ и выразив амплитуду, получим

$$A = \frac{T}{2\pi}\sqrt{\frac{2E}{m}}. \qquad (1.17)$$

Подставим числовые значения величин и произведем вычисления:

$$A = \frac{2}{2 \cdot 3{,}14}\sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}}} \text{ м} = 0{,}045 \text{ м}.$$

Так как частица совершает гармонические колебания, то сила, действующая на нее, является квазиупругой и, следовательно, может быть выражена соотношением

$$|F| = kx,$$

где k – коэффициент квазиупругой силы;

x – смещение колеблющейся точки.

Максимальное значение сила приобретает при максимальном смещении x_{max}, равном амплитуде, т.е.

$$F_{max} = kA. \qquad (1.18)$$

Коэффициент k выразим через период колебаний:

$$k = m\omega^2 = m\frac{4\pi^2}{T^2}. \qquad (1.19)$$

Подставив в уравнение (1.18) выражения для k из формулы (1.19) и A из формулы (1.17), после сокращений и упрощений получим

$$F_{max} = \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{2mE}.$$

Произведем вычисления:

$$F_{\max} = \frac{2 \cdot 3{,}14}{2}\sqrt{2 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-3}} = 4{,}44 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

Задача 1.8

Складываются два колебания одинакового направления, выраженные уравнениями

$$x_1 = A_1 \cos\frac{2\pi}{T}(t + \tau_1);$$

$$x_2 = A_2 \cos\frac{2\pi}{T}(t + \tau_2),$$

где $A_1 = 3$ см; $A_2 = 2$ см; $\tau_1 = 1/6$ с; $\tau_2 = 1/3$ с; $T = 2$ с.

Построить векторную диаграмму сложения этих колебаний и написать уравнение результирующего колебания.

Дано:

$x_1 = A_1 \cos\frac{2\pi}{T}(t + \tau_1)$;

$x_2 = A_2 \cos\frac{2\pi}{T}(t + \tau_2)$;

$A_1 = 3$ см;

$A_2 = 2$ см;

$\tau_1 = \frac{1}{6}$ с;

$\tau_2 = \frac{1}{3}$ с;

$T = 2$ с.

$X = f(t)$?

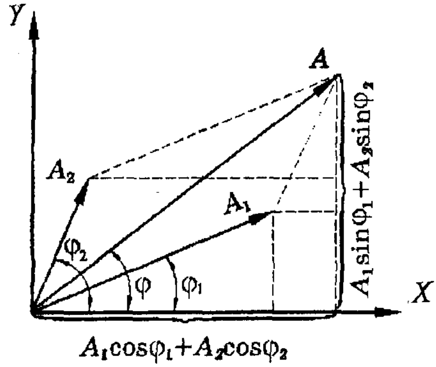

Рис. 1.3

Решение

Для построения векторной диаграммы сложения двух колебаний одного направления надо фиксировать какой-либо момент времени. Обычно векторную диаграмму строят для момента времени $t = 0$. Преобразовав оба уравнения к канонической форме

$$x = A\cos(\omega t + \varphi),$$

получим

$$x_1 = A_1\cos(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{T}\tau_1);$$

$$x_2 = A_2\cos(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{T}\tau_2).$$

Отсюда видно, что оба складываемых гармонических колебания имеют одинаковую циклическую частоту $\omega = 2\pi / T$. Начальные фазы 1-го и 2-го колебаний соответственно равны

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{T}\tau_1; \ \varphi_2 = \frac{2\pi}{T}\tau_2.$$

Произведем вычисления:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2}\ \text{с}^{-1} = 3{,}14\ \text{с}^{-1};$$

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{2} \cdot \frac{1}{6}\ \text{рад} = 30^\circ; \ \varphi_2 = \frac{2\pi}{2} \cdot \frac{1}{3}\ \text{рад} = 60^\circ.$$

Изобразим векторы A_1 и A_2. Для этого отложим отрезки длиной $A_1 = 3$ см и $A_2 = 2$ см под углами $\varphi_1 = 30^\circ$ и $\varphi_2 = 60^\circ$ к оси OX. Результирующие колебания будут происходить с той же частотой и амплитудой $\vec{A}$, равной геометрической сумме амплитуд A_1 и A_2:

$$\vec{A} = \vec{A_1} + \vec{A_2}.$$

Согласно теореме косинусов,

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Начальную фазу результирующего колебания можно определить непосредственно из векторной диаграммы (рис. 1.3):

$$\varphi = \mathrm{arctg}\frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2}.$$

Произведем вычисления:

$$A = \sqrt{3^2 + 2^2 + 3 \cdot 3 \cdot 2\cos(60^\circ - 30^\circ)}\ \text{см} = 4{,}84\ \text{см};$$

$$\varphi = \mathrm{arctg}\frac{3\sin 30^\circ + 2\sin 60^\circ}{3\cos 30^\circ + 2\cos 60^\circ} = \mathrm{arctg}\,0{,}898 = 42^\circ \quad \text{или } 0{,}735 \text{ рад}.$$

Так как результирующее колебание является гармоническим, имеет ту же частоту, что и слагаемые колебания, его можно записать в виде

$$x = A\cos(\omega t + \varphi),$$

где $A = 4{,}84$ см; $\omega = 3{,}14\ \text{с}^{-1}$; $\varphi = 0{,}735$ рад.

Задача 1.9

Материальная точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях, уравнения которых:

$$x = A_1\cos\omega_1 t, \tag{1.20}$$

$$y = A_2\cos\omega_2 t, \tag{1.21}$$

где $A_1 = 1$ см; $A_2 = 2$ см; $\omega_1 = \pi\ \text{с}^{-1}$; $\omega_2 = \frac{\pi}{2}\ \text{с}^{-1}$.

Найти уравнение траектории точки. Построить траекторию с соблюдением масштаба и указать направление движения точки.

Дано:

$x = A_1 \cos\omega_1 t$;

$y = A_2 \cos\omega_2 t$;

$A_1 = 1$ см;

$A_2 = 2$ см;

$\omega_1 = \pi$ с$^{-1}$;

$\omega_2 = \dfrac{\pi}{2}$ с$^{-1}$.

$y = f(x)$?

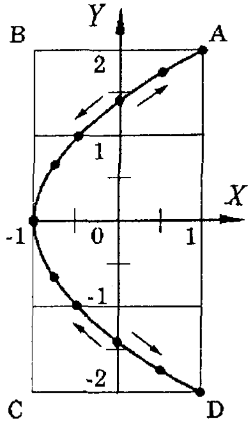

Рис. 1.4

Решение

Чтобы определить траекторию точки, исключим время из уравнений (1.20) и (1.21). Заметив, что

$$y = A_2 \cos(\omega_1 / 2)t,$$

применим формулу косинуса половинного угла:

$$\cos(\alpha / 2) = \pm\sqrt{(1 + \cos\alpha)/2}.$$

Используя это соотношение, можно написать

$$y = 2\cos\frac{\omega_1 t}{2} = 2\sqrt{\frac{1 + \cos\omega_1 t}{2}}\,; \tag{1.22}$$

$$x = \cos\omega_1 t, \tag{1.23}$$

откуда

$$y = \pm 2\sqrt{(1 + x)/2} \ \text{ или } \ y = \pm\sqrt{2x + 2}\,). \tag{1.24}$$

Полученное уравнение представляет собой уравнение параболы, ось которой лежит на оси OX. Как показывают уравнения (1.20) и (1.21), амплитуда колебаний точки по оси OX равна 1, а по оси OY – 2. Следовательно, абсциссы всех точек траектории заключены в пределах от –1 до +1, а ординаты – от –2 до +2.

Для построения траектории найдем по уравнению (1.22) значения y, соответствующие ряду значений x, удовлетворяющих условию $|x| \le 1$:

x	$y=\sqrt{2x+2}$		x	$y=\sqrt{2x+2}$
-1	0		0	±1,41
-0,75	±0,71		0,5	±1,73
-0,5	±1		1	±2

Начертив координатные оси и выбрав единицу длины – сантиметр, построим точки. Соединив их плавной кривой, получим траекторию результирующего колебания точки. Она представляет собой часть параболы, заключенной внутри прямоугольника амплитуд $ABCD$ (рис. 1.4). Из уравнений (1.20) и (1.21) находим, что период колебаний точки по горизонтальной оси $T_x = 2$ с, а по вертикальной оси $T_y = 4$ с. Следовательно, когда точка совершит одно полное колебание по оси OX, она совершит только половину полного колебания по оси OY.

В начальный момент (при $t = 0$) имеем: $x = 1$; $y = 2$. Точка находится в положении A. При $t = 1$ с получим: $x = -1$; $y = 0$. Материальная точка находится в вершине параболы. При $t = 2$ с получим: $x = 1$; $y = -2$. Материальная точка находится в положении D. После этого она будет двигаться в обратном направлении.

Задача 1.10

Плоская волна распространяется вдоль прямой со скоростью 20 м/с. Две точки, находящиеся на этой прямой на расстояниях 12 и 15 м от источника волн, колеблются с разностью фаз 0,75 π. Найти длину волны, написать уравнение волны и найти смещение указанных точек в момент времени 1,2 с, если амплитуда колебаний – 0,1 м.

Дано:
$\upsilon = 20$ м/с;
$x_1 = 12$ м;
$x_2 = 15$ м;
$\Delta\varphi = 0{,}75\ \pi$;
$A = 0{,}1$ м;
$t = 1{,}2$ с.
$\lambda = ?$

Решение

Точки, находящиеся друг от друга на расстоянии, равном длине волны λ, колеблются с разностью фаз, равной 2π; точки, находящиеся друг от друга на любом расстоянии Δx, колеблются с разностью фаз, равной

$$\Delta\varphi = \Delta x \cdot 2\pi / \lambda = (x_2 - x_1)2\pi / \lambda.$$

Решая это равенство относительно λ, получаем

$$\lambda = 2\pi(x_2 - x_1) / \Delta\varphi. \qquad (1.25)$$

Подставив числовое значение величин, входящих в выражение (1.25), и выполнив арифметические действия, получим

$$\lambda = \frac{2\pi(15-12)}{0{,}75\pi}\ \text{м} = 8\ \text{м}.$$

Чтобы написать уравнение плоской волны, надо еще найти циклическую частоту ω. Так как

$$\omega = 2\pi/T,$$

где $T = \lambda/\upsilon$ – период колебаний, то

$$\omega = 2\pi\upsilon / \lambda.$$

Произведем вычисления:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 20}{8} \text{ с}^{-1} = 5\pi \text{ с}^{-1}.$$

Зная амплитуду A колебаний, циклическую частоту ω и скорость υ распространения волны, можно написать уравнение плоской волны для данного случая:

$$y = A\cos\omega(t - x/\upsilon), \qquad (1.26)$$

где $A = 0{,}1$ м; $\omega = 5\pi$ с$^{-1}$; $\upsilon = 20$ м/с.

Чтобы найти смещение указанных точек, достаточно в уравнение (1.26) подставить значения t и x:

$$y_1 = 0{,}1\cos 5\pi(1{,}2 - 12/20) = 0{,}1\cos 3\pi = -0{,}1 \text{ м};$$

$$y_2 = 0{,}1\cos 5\pi(1{,}2 - 15/20) \text{ м} = 0{,}1\cos 2{,}25\pi \text{ м} = 0{,}071 \text{ м}.$$

Задача 1.11

Определить число молекул, содержащихся в объеме 1 мм^3 воды, и массу молекулы воды. Считая условно, что молекулы воды имеют вид шариков, соприкасающихся друг с другом, найти диаметр молекул.

Дано:

$V = 1 \text{ мм}^3 = 1 \cdot 10^{-9}$ м.

$d = ?$;
$N = ?$;
$m_0 = ?$

Решение

Число N молекул, содержащихся в некоторой системе массой m, равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν:

$$N = \nu N_A.$$

Так как

$$\nu = m/\mu,$$

где μ – молярная масса, то

$$N = (m/\mu)N_A.$$

Выразив в этой формуле массу как произведение плотности на объем V, получим

$$N = \rho V N_A / \mu. \tag{1.27}$$

Произведем вычисления, учитывая, что для воды $\mu =$ $= 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль:

$$\rho = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

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

$$N = \frac{10^3 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ молекул} = 3{,}34 \cdot 10^{19} \text{ молекул}.$$

Массу m_0 одной молекулы можно найти по формуле

$$m_0 = \mu / N_A. \tag{1.28}$$

Подставив в (1.28) значения μ и N_A, найдем массу молекулы воды:

$$m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6{,}02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 2{,}99 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Если молекулы воды плотно прилегают друг к другу, то можно считать, что на каждую молекулу приходится объем (кубическая ячейка)

$$V_0 = d^3,$$

где d – диаметр молекулы.

Отсюда

$$d = \sqrt[3]{V_0}. \qquad (1.29)$$

Объем V_0 найдем, разделив молярный объем V_m на число молекул в моле, т. е. на N_A:

$$V_0 = V_m / N_A. \qquad (1.30)$$

Подставим выражение (1.30) в (1.29):

$$d = \sqrt[3]{V_m / N_A},$$

где $V_m = \mu / \rho$.

Тогда

$$d = \sqrt[3]{\mu / (\rho N_A)}. \qquad (1.31)$$

Проверим, дает ли правая часть выражения (1.31) единицу длины:

$$\left\{\frac{[\mu]}{[\rho][N_A]}\right\}^{1/3} = \left\{\frac{1 \text{ кг/моль}}{1 \text{ кг/м}^3 \cdot 1 \text{ моль}^{-1}}\right\} = 1 \text{ м}.$$

Произведем вычисления:

$$d = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}} \text{ м} = 3{,}11 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Задача 1.12

В баллоне объемом 10 л находится гелий под давлением 1 МПа и при температуре 300 К. После того как из баллона было взято 10 г гелия, температура в нем понизилось до 290 К. Определить давление гелия, оставшегося в баллоне.

Дано:	
$V = 10$ л $= 1 \cdot 10^{-2}$ м^3; $P_1 = 1$ МПа $= 1 \cdot 10^6$ Па; $T_1 = 300$ К; $T_2 = 290$ К; $m = 10$ г $= 0{,}01$ кг.	
$P_2 = ?$	

Решение

Для решения задачи воспользуемся уравнением Менделеева – Клапейрона, применив его к конечному состоянию газа:

$$P_2V = (m_2 / \mu)RT_2, \tag{1.32}$$

где m_2 – масса гелия в баллоне в конечном состоянии;

μ – молярная масса гелия;

R – универсальная газовая постоянная.

Из уравнения (1.32) выразим искомое давление:

$$P_2 = m_2RT_2 / (\mu V). \tag{1.33}$$

Массу m_2 гелия выразим через массу m_1, соответствующую начальному состоянию, и массу m гелия, взятого из баллона:

$$m_2 = m_1 - m. \tag{1.34}$$

Массу m_1 гелия найдем также из уравнения Менделеева – Клапейрона, применив его к начальному состоянию:

$$m_1 = \mu P_1V / (RT_1). \tag{1.35}$$

Подставив выражение массы m_1 в (1.34), а затем выражение m_2 в (1.33), найдем

$$P_2 = \left(\frac{\mu P_1V}{RT_1} - m\right)\frac{RT_2}{V\mu},$$

или после преобразования и сокращения

$$P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1 - \frac{m}{\mu} \cdot \frac{RT_2}{V}. \qquad (1.36)$$

Произведем вычисления, учитывая, что

$$R = 8{,}31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К};$$

$$m = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль};$$

$$P_2 = \left(\frac{290}{300} \cdot 10^{-6} - \frac{10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{8{,}31}{10^{-2}} \cdot 290 \right) \text{Па} = 3{,}64 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Задача 1.13

Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме c_V и постоянном давлении c_P неона и водорода, принимая эти газы за идеальные.

Дано:

Газы:
неон (Ne);
водород (H_2).

$c_{V(N_e)} = ?$

$c_{P(N_e)} = ?$

$c_{V(H_2)} = ?$

$c_{P(H_2)} = ?$

Решение

Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_P = \frac{i+2}{2}\cdot\frac{R}{\mu}; \quad c_V = \frac{iR}{2\mu}, \tag{1.37}$$

где i – число степеней свободы молекулы газа;

μ – молярная масса.

Для неона (одноатомный газ) $i = 3$; $\mu = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. При вычислениях по формулам (1.37) получим

$$c_V = \frac{3\cdot 8{,}31}{2\cdot 20\cdot 10^{-3}}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)} = 6{,}24\cdot 10^{2}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)};$$

$$c_P = \frac{(3+2)\cdot 8{,}31}{2\cdot 20\cdot 10^{-3}}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)} = 1{,}04\cdot 10^{3}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Для водорода (двухатомный газ) $i = 5$; $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. При вычислениях по тем же формулам получим

$$c_V = \frac{5\cdot 8{,}31}{2\cdot 2\cdot 10^{-3}}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)} = 1{,}04\cdot 10^{4}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)};$$

$$c_P = \frac{(5+2)\cdot 8{,}31}{2\cdot 2\cdot 10^{-3}}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)} = 1{,}46\cdot 10^{4}\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Задача 1.14

Вычислить удельные теплоемкости c_V и c_P смеси неона и водорода, если массовая доля неона $w_1 = 80\%$; массовая доля водорода $w_2 = 20\%$. Значения удельных теплоемкостей газов взять из предыдущего примера.

Дано:

$c_{V_1} = c_{V(Ne)} = 6,24 \cdot 10^2$ Дж/кг · К;

$c_{P_1} = c_{P(Ne)} = 1,04 \cdot 10^3$ Дж/кг · К;

$c_{V_2} = c_{V(H_2)} = 1,04 \cdot 10^4$ Дж/кг · К;

$c_{P_2} = c_{P(H_2)} = 1,46 \cdot 10^4$ Дж/кг · К;

$w_1 = 80$ %;

$w_2 = 20$ %.

$c_P = ?$;

$c_V = ?$

Решение

Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме c_V найдем следующим образом.

Теплоту, необходимую для нагревания смеси на ΔT, выразим двумя способами:

$$Q = c_V (m_1 + m_2) \Delta T; \tag{1.38}$$

$$Q = (c_{V_1} m_1 + c_{V_2} m_2) \Delta T, \tag{1.39}$$

где c_{V_1} – удельная теплоемкость неона;

c_{V_2} – удельная теплоемкость водорода.

Приравняв правые части (1.38) и (1.39) и разделив обе части полученного равенства на ΔT, получим

$$c_V (m_1 + m_2) = c_{V_1} m_1 + c_{V_2} m_2,$$

откуда

$$c_V = c_{V_1} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + c_{V_2} \frac{m_2}{m_1 + m_2} \tag{1.40}$$

или

$$c_V = c_{V_1} w_1 + c_{V_2} w_2, \tag{1.41}$$

где $w_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$; $w_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$ – массовые доли неона и водорода в смеси.

Подставив в формулу (1.41) числовые значения величин, найдем

$$c_V = (6{,}24 \cdot 10^2 \cdot 0{,}8 + 1{,}04 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2)\ \text{Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 2{,}58 \cdot 10^3\ \text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Рассуждая таким же образом, получим формулу для вычисления удельной теплоемкости смеси при постоянном давлении

$$c_P = c_{P_1} w_1 + c_{P_2} w_2. \qquad (1.42)$$

Подставим в формулу (1.42) числовые значения величин:

$$c_P = (1{,}04 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 + 1{,}46 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2)\ \text{Дж/(кг·К)} = 3{,}75 \cdot 10^3\ \text{Дж/(кг·К)}.$$

Задача 1.15

В цилиндре под поршнем находится водород массой 0,02 кг при температуре 300 К. Водород сначала расширялся адиабатически, увеличив свой объем в 5 раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в 5 раз. Найти температуру в конце адиабатического расширения и работу, совершенную газом при этих процессах. Изобразить процесс графически.

Дано:

$m = 0{,}02$ кг;

$T = 300$ К;

$n_1 = 5$;

$n_2 = 5$.

$T_2 = ?$

$A_1 = ?$

$A_2 = ?$

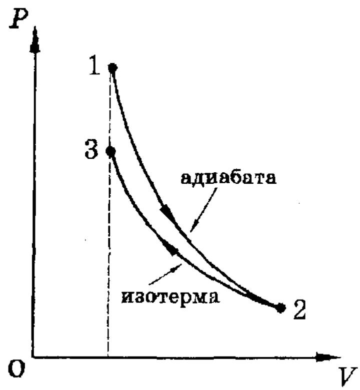

Рис. 1.5

Решение

Температуры и объемы газа, совершающего адиабатический процесс, связаны между собой соотношением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{n^{\gamma-1}}, \tag{1.43}$$

где γ – отношение теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме, для водорода как двухатомного газа

$$\gamma = 1{,}4, \ \mu = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль};$$

$$n_1 = \frac{V_2}{V_1} = 5.$$

Отсюда получаем выражение для конечной температуры T_2:

$$T_2 = \frac{T_1}{n_1^{\gamma-1}}. \tag{1.44}$$

Подставляя числовые значения заданных величин, находим

$$T_2 = \frac{300}{5^{1,4-1}} = \frac{300}{1{,}91} \text{ К} = 157 \text{ К}.$$

Работа A_1 газа при адиабатическом расширении может быть определена по формуле

$$A_1 = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2) = \frac{miR(T_1 - T_2)}{2\mu}, \tag{1.45}$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Подставив числовые значения величин: $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К); $i = 5$ (для водорода как двухатомного газа); $m = 0{,}02$ кг; $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль ; $T_1 = 300$ К; $T_2 = 157$ К в правую часть формулы (1.45) и выполняя арифметические действия, получим

$$A_1 = \frac{0{,}02 \cdot 5 \cdot 8{,}31}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2}(300 - 157) \text{ Дж} = 2{,}98 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Работа A_2 газа при изотермическом процессе может быть выражена в виде

$$A_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_3}{V_2}; \quad A_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{1}{n_2}, \tag{1.46}$$

где $n_2 = \dfrac{V_2}{V_3}$.

Подставим в формулу (1.46) числовые значения величин:

$$A_2 = \frac{0{,}02}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8{,}31 \cdot 157 \cdot \ln\frac{1}{5} \text{ Дж} = -21 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Знак «минус» показывает, что при сжатии газа работа совершается над газом внешними силами. График процесса приведен на рис. 1.5.

Задача 1.16

Тепловая машина работает по обратимому циклу Карно. Температура нагревателя 500 К. Определить термический КПД цикла и температуру холодильника тепловой машины, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от нагревателя, машина совершает работу 350 Дж.

Дано:

$A = 350$ Дж;
$T_1 = 500$ К.

$T_2 = ?$;
$\eta = ?$

Решение

Термический КПД тепловой машины показывает, какая доля теплоты, полученной от нагревателя, превращается в механическую работу.

Термический КПД выражается формулой

$$\eta = A/Q_1, \tag{1.47}$$

где Q_1 – теплота, полученная от нагревателя;

A – работа, совершенная рабочим телом тепловой машины.

Подставив числовые значения в эту формулу, получим

$$\eta = \frac{350}{1000} = 0{,}35.$$

Зная КПД цикла, можно по формуле

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

определить температуру холодильника T_2:

$$T_2 = T_1 (1 - \eta). \tag{1.48}$$

Подставив в эту формулу полученное значение КПД и температуры T_1 нагревателя, получим

$$T_2 = 500\ (1 - 0{,}35)\ \text{К} = 325\ \text{К}.$$

Задача 1.17

Найти добавочное давление внутри мыльного пузыря диаметром d. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть этот пузырь?

Дано:
d.
$A = ?$
$\Delta p = ?$

Решение

Пленка мыльного пузыря имеет две сферические поверхности – внешнюю и внутреннюю. Обе поверхности оказывают давление на воздух, заключенный внутри пузыря. Так как толщина пленки чрезвычайно мала, диаметры обеих поверхностей практически одинаковы. Поэтому добавочное давление

$$\Delta p = 2\frac{2\alpha}{r},$$

где R – радиус пузыря;

α – коэффициент поверхностного натяжения мыльного пузыря.

Так как $r = d / 2$, то $\Delta p = 8\alpha / d$. Работа, которую нужно совершить, чтобы, растягивая пленку, увеличить ее поверхность на ΔS, выражается формулой

$$A = \alpha\Delta S \quad \text{или} \quad A = \alpha(S - S_0),$$

где S – общая площадь двух сферических поверхностей пленки мыльного пузыря;

S_0 – общая площадь двух поверхностей плоской пленки, затягивающей отверстие трубки до выдувания пузыря.

Пренебрегая S_0, получаем

$$A = \alpha S = 2\pi d^2\alpha.$$

Задача 1.18

Как изменится энтропия 2 г водорода, занимающего объем 40 л при 270 К, если давление увеличить вдвое при постоянной температуре, и затем повысить температуру до 320 К?

Дано:

$m = 2$ г $= 2 \cdot 10^{-3}$ кг;
$V = 40$ л;
$T_1 = 270$ К;
$T_2 = 320$ К;
$P_2 = 2P_1$.

$\Delta S = ?$

Решение

Изменение энтропии определяется формулой

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\mathrm{d}Q}{T}, \tag{1.49}$$

где dQ – изменение количества теплоты;

T – термодинамическая температура.

Изменение количества теплоты находим из первого закона термодинамики для идеального газа:

$$dQ = \frac{m}{\mu} C_V dT + PdV, \tag{1.50}$$

где m – масса газа;

μ – молярная масса;

C_V – молярная изохорная теплоемкость;

dT – изменение температуры газа;

P – давление газа;

dV – изменение объема;

PdV – работа расширения газа.

Величину P найдем из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$P = \frac{m}{\mu V} RT. \tag{1.51}$$

Для двухатомных газов

$$C_V = \frac{5}{2} R, \tag{1.52}$$

где R = 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Подставляя (1.51) и (1.52) в (1.50), находим

$$\mathrm{d}Q = \frac{5 \cdot m}{2 \cdot \mu} R\,\mathrm{d}T + \frac{m}{\mu} RT \frac{\mathrm{d}V}{V}. \tag{1.53}$$

Подставляя (1.53) в (1.49), получаем

$$\Delta S = \frac{5 \cdot m}{2 \cdot \mu} R \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + \frac{mRT_1}{\mu T_1} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} R\left(\frac{5}{2} \ln \frac{T_2}{T_1} + \ln \frac{V_2}{V_1}\right). \tag{1.54}$$

Для изотермического процесса

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}.$$

Тогда уравнение (1.54) примет вид

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} R\left(\frac{5}{2} \ln \frac{T_2}{T_1} - \ln \frac{P_2}{P_1}\right). \tag{1.55}$$

Производим вычисления:

$$\Delta S = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8{,}31 \left(\frac{5}{2} \ln \frac{320}{270} - \ln 2\right) = -2{,}27 \text{ Дж/К}.$$

Задача 1.19

Вычислить эффективный диаметр молекул азота, если его критическая температура 126 К, критическое давление 3,4 МПа.

Дано:

$T_{кр} = 126$ К;

$P_{кр} = 3{,}4$ МПа $= 3{,}14 \cdot 10^6$ Па.

$d = ?$

Решение

Азот, согласно условию задачи, должен подчиняться уравнению Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p+\frac{m^2\cdot a}{\mu^2\cdot V^2}\right)\cdot\left(V-\frac{m}{\mu}b\right)=\frac{m}{\mu}RT. \qquad (1.56)$$

Постоянную b в уравнении Ван-дер-Ваальса с достаточной степенью точности считают равной учетверенному собственному объему 1 моля газа. В 1 моле газа находится $6{,}02\cdot10^{23}$ молекул ($N_A=6{,}02\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$), следовательно, объем одной молекулы равен

$$V=\frac{\pi d^3}{6}=\frac{b}{4N_A}, \qquad (1.57)$$

откуда $d=\sqrt[3]{3b/(2\pi N_A)}$.

Постоянная $b = T_{кр}R\,/\,(8P_{кр})$, тогда

$$d=\sqrt[3]{\frac{3T_{кр}R}{16\pi P_{кр}N_A}}=\sqrt[3]{\frac{3\cdot126\cdot8{,}31}{16\cdot3{,}14\cdot3{,}4\cdot10^6\cdot6{,}02\cdot10^{23}}}=3{,}1\cdot10^{-10}\ \text{м}.$$

Контрольная работа №1

Таблица вариантов

№	Номера задач							
0	110	120	130	140	150	160	170	180
1	101	111	121	131	141	151	161	171
2	102	112	122	132	142	152	162	172
3	103	113	123	133	143	153	163	173
4	104	114	124	134	144	154	164	174
5	105	115	125	135	145	155	165	175
6	106	116	126	136	146	156	166	176
7	107	117	127	137	147	157	167	177
8	108	118	128	138	148	158	168	178
9	109	119	129	139	149	159	169	179

101. Вагон движется равнозамедленно с отрицательным ускорением $-0,5$ м/с^2. Начальная скорость вагона 54 км/ч. Через сколько времени и на каком расстоянии от начальной точки вагон остановится?

102. Зависимость пройденного телом пути S от времени t дается уравнением $S = A + Bt + C\,t^2 + D\,t^3$. Через сколько времени после начала движения ускорение тела будет равно a? Чему равно среднее ускорение тела за этот промежуток времени?

103. Материальная точка движется согласно уравнениям $x = 7 + 4t$; $y = 2 + 3t$. Какова скорость движения материальной точки?

104. Тело брошено с вышки в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с. Определить скорость, тангенциальное и нормальное ускорения тела через 2 секунды после начала движения.

105. Две прямые дороги пересекаются под углом 60°. От перекрестка по ним удаляются машины: одна – со скоростью 60 км/ч, другая – со скоростью 80 км/ч. Определить скорости, с которыми одна машина удаляется от другой (перекресток машины прошли одновременно).

106. Тело, брошенное вертикально вверх, находилось на одной и той же высоте 8,6 м 2 раза с интервалом 3 с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, вычислить начальную скорость брошенного тела.

107. Колесо автомашины вращается равноускоренно. Сделав 50 полных оборотов, оно изменило частоту вращения от 4 об/с до 6 об/с . Определить угловое ускорение колеса.

108. По окружности радиусом 20 см движется материальная точка. Уравнение ее движения $S = 2\,t^2 + t$. Чему равны тангенциальное, нормальное и полное ускорения точки в момент времени, равный 10 с?

109. Точка движется по окружности радиусом 30 см с постоянным угловым ускорением. Определить тангенциальное ускорение точки, если известно, что за время 4 с она совершила 3 оборота, и в конце третьего оборота ее нормальное ускорение равно 2,7 м/с^2.

110. Колесо, вращаясь равнозамедленно, при торможении уменьшило свою частоту за 1 минуту с 300 до 180 об. Найти угловое ускорение колеса и число оборотов, сделанное им за это время.

111. Диск радиусом 20 см вращается согласно уравнению $\varphi = A + Bt + Ct^3$, где A = 3 рад; B = -1 рад/с; C = 0,1 рад/с^3. Найти тангенциальное, нормальное и полное ускорения точек на окружности диска в конце десятой секунды после начала вращения.

112. Шайба, пущенная по поверхности льда с начальной скоростью 20 м/с, остановилась через 40 с. Найти коэффициент трения шайбы о лед.

113. Шарик массой 110 г упал с высоты 2,5 м на горизонтальную плиту, масса которой намного больше массы шарика, и отскочил от нее вверх. Считая удар абсолютно упругим, определить импульс, полученный плитой.

114. Тело массой 0,5 кг движется прямолинейно, причем зависимость пройденного пути от времени дается уравнением $S = Ct^2 - Dt^3$, где $C = 5$ м/с^2; $D = 1$ м/с^3. Найти силу, действующую на него в конце первой секунды движения.

115. Автомобиль массой 1020 кг останавливается при торможении за 5 с, пройдя при этом равнозамедленно расстояние 25 м. Найти начальную скорость автомобиля и силу торможения.

116. На столе стоит тележка массой 4 кг. К тележке привязан один конец шнура, перекинутого через блок. С каким ускорением будет двигаться тележка, если к другому концу шнура привязать гирю массой 1 кг? Трение не учитывать.

117. Автомобиль массой 5 т движется со скоростью 10 м/с по выпуклому мосту. Определить силу давления автомобиля на мост в его верхней части, если радиус кривизны моста равен 50 м.

118. Снаряд массой 2 кг, летящий со скоростью 30 м/с, попадает в мишень с песком массой 100 кг и застревает в ней. С какой скоростью и в каком направлении будет двигаться мишень после попадания снаряда в случаях: 1) мишень неподвижна; 2) мишень двигается в одном направлении со снарядом со скоростью 72 км/ч?

119. Стальной шарик массой 10 г упал с высоты 1 м на стальную плиту и подскочил после удара на 0,8 м. Определить импульс, полученный плитой.

120. Две гири массами 1,9 и 0,9 кг соединены гибкой нерастяжимой нитью, перекинутой через неподвижный блок, вращающийся без трения. С каким ускорением будут двигаться грузы? Чему равна сила натяжения нити? Массой блока и нити пренебречь.

121. На барабан массой 9 кг намотан шнур, к концу которого привязан груз массой 2 кг. Найти ускорение груза. Барабан считать однородным цилиндром. Трением нити пренебречь, шнур считать невесомым и нерастяжимым.

122. Маховое колесо, имеющее момент инерции 245 $кг \cdot м^2$, вращается, делая 20 об/с. Через минуту после того, как на него перестал действовать вращающий момент, оно остановилось. Найти: 1) момент сил трения; 2) число оборотов, которое сделало колесо до полной остановки после прекращения действия сил.

123. Кинетическая энергия вала, вращающегося с постоянной скоростью, соответствующей частоте 5 об/с, равна 60 Дж. Найти момент импульса вала.

124. Найти линейное ускорение движения центра масс диска, скатывающегося с наклонной плоскости без скольжения. Угол наклона плоскости равен 30^0.

125. К ободу диска массой 5 кг приложена касательная сила 19,6 Н. Какую кинетическую энергию будет иметь диск через 5 с после начала действия силы?

126. Шар массой 4 кг движется со скоростью 5 м/с и сталкивается с шаром массой 6 кг, который движется ему навстречу со скоростью 2 м/с. Определить скорости шаров после удара. Удар считать абсолютно упругим, прямым, центральным.

127. Из ствола автоматического пистолета вылетела пуля массой 10 г со скоростью 30 м/с. Затвор пистолета массой 200 г прижимается к стволу пружиной, жесткость которой равна 25 кН/м. На какое расстояние отойдет затвор после выстрела? Считать, что пистолет жестко закреплен.

128. Орудие, жестко закрепленное на железнодорожной платформе, производит выстрел вдоль полотна железной дороги под углом 30° к линии горизонта. Определить скорость отката платформы, если снаряд вылетает со скоростью 480 м/с. Масса платформы с орудием и снарядами – 18 т, масса снаряда – 60 кг.

129. Определить работу растяжения двух соединенных последовательно пружин жесткостями 400 Н/м и 250 Н/м, если первая пружина при этом растянулась на 2 см.

130. Какая работа будет совершена силами гравитационного поля при падении на Землю тела массой 2 кг: 1) с высоты 1000 км; 2) из бесконечности?

131. Определить частоту гармонических колебаний диска радиусом 20 см около горизонтальной оси, проходящей через середину радиуса диска перпендикулярно его плоскости.

132. Определить возвращающую силу в момент времени 0,2 с и полную энергию точки массой 20 г, совершающей гармонические колебания согласно уравнению $x = A\sin\omega t$, где A = 15 см; $\omega = 4\pi\ c^{-1}$.

133. Точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, уравнения которых $x = A_1 \sin\omega_1 t$ и $y = A_2 \cos\omega_2 t$, где A_1 = 8 см; A_2 = 4 см; $\omega_1 = \omega_2 = 2\ c^{-1}$. Написать уравнение траектории и построить ее. Показать направление движения точки.

134. Определить период колебаний стержня длиной 30 см около горизонтальной оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец.

135. Складывается два колебания одинакового направления и одинакового периода: $x_1 = A_1 \sin\omega t$ и $x_2 = A_2 \sin\omega(t + \tau)$, где $A_1 = A_2$ = 3 см; $\omega = \pi\ c^{-1}$; τ = 0,5 с. Определить амплитуду и начальную фазу результирующего колебания. Написать его уравнение. Построить векторную диаграмму для момента времени t = 0.

136. Определить скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний двух точек, отстоящих друг от друга на 15 см, равна $\pi/2$. Частота колебаний – 25 Гц.

137. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью 10 м/с. Период колебаний точек шнура – 1 с, амплитуда – 1,5 см. Определить длину волны, скорость и ускорение точки, отстоящей от источника колебаний на расстояние 20 см, в момент времени 5 с.

138. Определить скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний 2 точек среды, отстоящих друг от друга на расстояние 20 см, равна $\pi/3$. Частота колебаний – 50 Гц.

139. Волны в упругой среде распространяются со скоростью 15 м/с. Чему равно смещение точки, находящейся на расстоянии 3 м от источника колебаний, через 4 с от начала колебаний? Период колебаний – 1 с, амплитуда колебаний – 2 см.

140. Во сколько раз скорость распространения звука в воздухе летом (при температуре 27 °С) больше скорости распространения звука зимой (при температуре –33 °С)?

141. Котел объемом 20 л содержит углекислый газ массой 500 г под давлением 1,3 МПа. Определить температуру газа.

142. Сферический сосуд радиусом r, содержащий газ при давлении P_1 и температуре T_1, находится в вакууме. Через отверстие в сосуде часть газа вытекает. Каким станет давление в сосуде, если из него выйдет N молекул газа?

143. Какой объем занимает смесь газов, состоящая из азота массой 1 кг и гелия массой 1 кг при нормальных условиях?

144. Сравнить количество вещества в алюминиевой и железной отливках: 1) равных масс; 2) равных объемов.

145. В шарике ртутного термометра содержится $3{,}6 \cdot 10^{21}$ молекул. Определить массу ртути в шарике термометра. Сколько молекул и какое количество вещества содержалось бы в шарике такого же объема спиртового (C_2H_5OH) термометра?

$$\rho_{сп} = 0{,}8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \;\; \rho_{рт} = 13{,}6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \; \mu_{рт} = 201 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

146. Смесь азота и гелия при температуре 27^0С находится под давлением $1{,}3 \cdot 10^2$ Па. Масса азота составляет 70% от общей массы смеси. Найти концентрацию молекул каждого из газов.

$$\mu_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль; } \mu_{He} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль; } \;\; N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

147. Смесь кислорода и азота при температуре 290 К и давлении 5,8 кПа имеет плотность 0,4 кг/м^3. Определить концентрацию молекул кислорода в смеси.

$$\mu_{O_2} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль; } \mu_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль; } N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

148. Максимальная температура, получаемая при мощных импульсах разрядов, достигает 10^6 К. Определить среднюю квадратичную скорость и среднюю кинетическую энергию поступательного движения ионов водорода при этой температуре.

$$\mu_H = 1 \cdot 10^{-3} \text{кг/моль.}$$

149. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при температуре 296 К равна 480 м/с. Сколько молекул содержится в 10 г этого газа?

150. Определить плотность газа в колбе электрической лампы накаливания, если молекулы газа производят на стенку колбы давление 80 КПа, а средний квадрат скорости поступательного движения молекул $2{,}5 \cdot 10^5$ м^2/с^2.

151. Найти среднюю квадратичную скорость, среднюю кинетическую энергию поступательного движения и среднюю полную кинетическую энергию молекул гелия и азота при температуре 27 °С. Определить полную энергию всех молекул 100 г каждого из газов.

152. 10 г кислорода находятся под давлением $3 \cdot 10^5$ Па при температуре 10 °С. После нагревания при постоянном давлении газ занял объем в 10 л. Найти: 1) количество тепла, полученного газом; 2) энергию теплового движения газа до и после нагревания.

153. Какое количество углекислого газа можно нагреть от 20 °С до 100 °С количеством тепла 8 кДж? На сколько при этом изменится кинетическая энергия одной молекулы? Во время нагревания газ расширяется при $p = \text{const}$; $\mu_{CO_2} = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

154. 2 л азота находятся под давлением 10^5 Па. Какое количество тепла надо сообщить азоту, чтобы: 1) при $p = \text{const}$ объем увеличить вдвое; 2) при $V = \text{const}$ давление увеличить вдвое?

$$\mu_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

155. Коэффициент диффузии водорода (H_2) при нормальных условиях равен 1,31 см^2/с. Определить величину коэффициента внутреннего трения молекул водорода (H_2) при этих же условиях.

156. Коэффициент внутреннего трения азота (N_2) при 0 °С равен $1{,}68 \cdot 10^{-4}$ г/см$\cdot$с. Определить значение средней длины свободного пробега молекул азота при нормальном давлении.

157. Какое количество теплоты необходимо для нагревания 9 г аргона от температуры 10 °С до температуры 25 °С, если он находится в цилиндре, закрытом тяжелым поршнем? Чему равно изменение внутренней энергии аргона?

$$\mu_{Ar} = 39{,}94 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

158. Разрядная трубка гелий-неонового лазера объемом 50 см^3 заполняется смесью гелия и неона с парциальными давлениями 150 Па и 30 Па соответственно. Определить внутреннюю энергию газов.

159. В теплоизолированный цилиндр объемом 10 л, содержащий азот при температуре 27 °С и давлении 0,01 МПа, внесен медный шар массой 100 г, нагретый до 27 °С. Какая температура установится в цилиндре в результате теплообмена? Теплоемкостью цилиндра пренебречь.

160. 12 г азота находятся в закрытом сосуде объемом 2 л при $t = 10$ °С. После нагревания давление в сосуде стало равным 10^4 мм рт. ст. Какое количество тепла сообщено газу при нагревании?

$$\mu_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

161. В сосуде объемом 10 л находится кислород (O_2) под давлением 10^5 Па. Стенки сосуда могут выдержать внутреннее давление до 10^6 Па. Газ идеальный: $C_P / C_V = 1{,}4$. Определить, какое максимальное количество теплоты можно сообщить газу в этом сосуде.

162. При изобарическом нагревании аргона газ совершил работу 8 Дж. Какое количество теплоты было сообщено газу?

163. Вода кипит в электрическом чайнике с нагревателем мощностью 1 кВт. Считая пар идеальным газом, определить скорость истечения пара из носика чайника, площадь сечения которого 1 см^2. Давление на конце носика 0,1 МПа.

164. Кислород массой 2 кг занимает объем 1 м^3 и находится под давлением 0,2 МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема 3 м^3, а затем при постоянном объеме до давления 0,5 МПа. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и теплоту, переданную газом. Построить график процесса.

165. При изобарическом нагревании от 0 до 100 °С моль идеального газа поглощает 3,35 кДж тепла. Определить приращение внутренней энергии газа; работу, совершаемую газом.

166. Некоторая масса азота при давлении 10^5 Па имела объем 5 л, а при давлении $3 \cdot 10^5$ Па – 2 л. Переход из первоначального состояния в конечное происходит в 2 этапа: сначала – при $V = \text{const}$, затем – при $P = \text{const}$ (газ считать идеальным). Определить количество теплоты, израсходованное при переходе из первоначального состояния в конечное. Изобразить графически этот переход.

167. В котле паровой машины температура 150 °С. Температура холодильника 10 °С. Какую максимальную работу можно получить от машины, если в топке, КПД которой – 80 %, сожжено 0,5 т каменного угля, теплотворная способность которого – 20,5 МДж/кг.

168. Тепловая электростанция мощностью 2,4 ГВт потребляет в час 150 т каменного угля. Перегретый пар, поступающий в турбину, имеет температуру *560 °С*; температура пара в конденсаторе 30 °С. Определить фактический КПД паровой турбины и сравнить его с КПД идеальной тепловой машины. Теплотворная способность каменного угля – 30,3 МДж/кг.

169. Определить КПД цикла, имеющего на диаграмме T, S вид, *изображенный на рис. 1.6* ($t_1 = 550$ °С; $t_2 = 300$ °С).

170. Определить КПД цикла, имеющего на диаграмме T, S вид, изображенный на рис. 1.7 ($t_1 = 570$ °С; $t_2 = 210$ °С).

171. Определить КПД цикла, имеющего на диаграмме T, S вид, изображенный на рис. 1.8 ($t_1 = 650$ °С; $t_2 = 250$ °С).

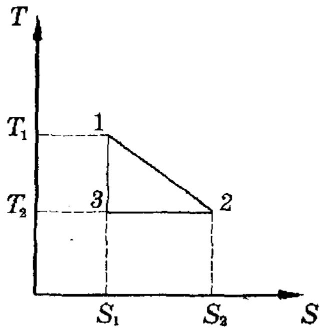

Рис. 1.6

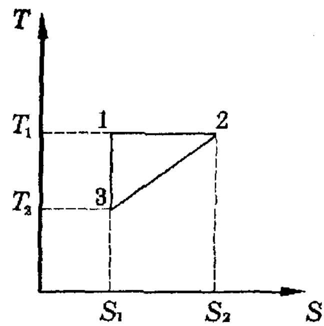

Рис. 1.7

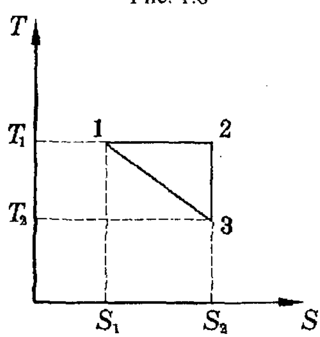

Рис. 1.8

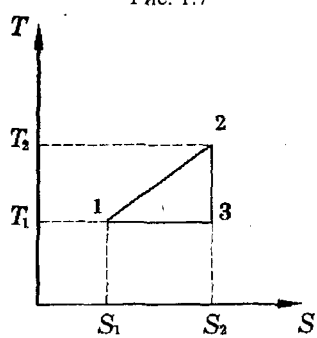

Рис. 1.9

172. Определить КПД цикла, имеющего на диаграмме T, S вид, изображенный на рис. 1.9 ($t_1 = 200$ °С; $t_2 = 600$ °С).

173. Найти постоянные в уравнении Ван-дер-Ваальса для углекислого газа, если критическая температура 304 К, критическое давление 7370 кПа.

174. Поправки для воды в уравнении Ван-дер-Ваальса равны: $a = 0{,}555$ Н $\cdot$ м^4/моль^2 ; $b = 3{,}06 \cdot 10^{-5}$ м^3/моль. Определить критические объем, температуру, давление для 1 кг воды.

175. Критическая температура углекислоты (CO_2) равна 31 °С, критическое давление 73 атм. Определить критический объем одного моля CO_2.

176. В воду опущена на очень малую глубину стеклянная трубка с диаметром канала 1 мм. Определить массу воды, вошедшей в трубку. Коэффициент поверхностного натяжения воды равен 0,072 Н/м.

177. Найти добавочное давление внутри мыльного пузыря диаметром 10 см. Какую работу надо совершить, чтобы выдуть этот пузырь?

178. Какую работу надо произвести, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром 14 см, если процесс раздувания пузыря изотермический? Чему равно избыточное давление внутри этого пузыря?

179. Какая энергия выделится при слиянии двух капель ртути диаметром 0,8 мм и 1,2 мм в одну каплю? Коэффициент поверхностного натяжения ртути равен 0,5 Н/м.

180. Кислород, масса которого – 200 г, нагревают от 27 °С до 127 °С. Найти изменение энтропии, если известно, что начальное и конечное давления одинаковы и близки к атмосферному.

2. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Примеры решения задач

Задача 2.1

На тонком стержне длиной 20 см находится равномерно распределенный электрический заряд. На продолжении оси стержня на расстоянии 10 см от ближайшего конца находится точечный заряд 40 нКл, который взаимодействует со стержнем с силой 6 мкН. Определить линейную плотность заряда на стержне.

Дано:

$l = 20$ см $= 0{,}2$ м;

$a = 10$ см $= 0{,}1$ м;

$q_1 = 40$ нКл $= 4 \cdot 10^{-8}$ Кл;

$F = 6$ мкН $= 6 \cdot 10^{-6}$ Н.

$\tau = ?$

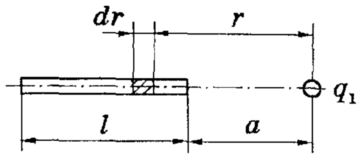

Рис. 2.1

Решение

Сила взаимодействия F заряженного стержня с точечным зарядом q_1 зависит от линейной плотности заряда на стержне. Зная эту зависимость, можно определить τ. При вычислении силы F следует иметь в виду, что заряд на стержне не является точечным, поэтому закон Кулона непосредственно применить нельзя.

В этом случае можно поступить следующим образом. Выделим из стержня (рис. 2.1) малый участок dr с зарядом $dq = \tau dr$. Этот заряд можно рассматривать как точечный. Тогда, согласно закону Кулона,

$$dF = \frac{q_1 \tau dr}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Интегрируя это выражение в пределах от a до $(a + l)$, получаем

$$F = \frac{q_1\tau}{4\pi\varepsilon_0}\int_a^{a+l}\frac{dr}{r^2} = \frac{q_1\tau}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l}\right) = \frac{q_1\tau l}{4\pi\varepsilon_0 a(a+l)},$$

откуда

$$\tau = \frac{4\pi\varepsilon_0 a(a+l)F}{q_1 l}.$$

Произведем вычисления:

$$\tau = \frac{0{,}1(0{,}1+0{,}2)\cdot 6\cdot 10^{-6}}{9\cdot 10^{9}\cdot 4\cdot 10^{-8}\cdot 0{,}2}\ \text{Кл/м} = 2{,}5\cdot 10^{-9}\ \text{Кл/м}.$$

Задача 2.2

По тонкому кольцу равномерно распределен заряд 40 нКл с линейной плотностью 50 нКл/м. Определить напряженность электрического поля, создаваемого этим зарядом в точке, лежащей на оси кольца и удаленной от его центра на расстояние, равное половине радиуса.

Дано:

$\tau = 50$ нКл/м $=$

$= 5 \cdot 10^{-8}$ Кл/м;

$a = R/2$;

$q = 40$ нКл $=$

$= 4 \cdot 10^{-8}$ Кл.

$E = ?$

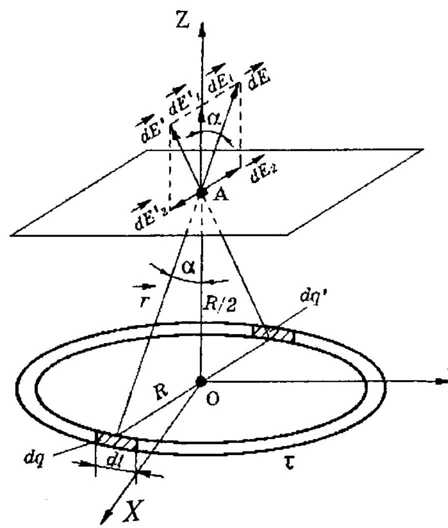

Рис. 2.2

Решение

Совместим координатную плоскость XOY с плоскостью кольца, а ось O – с осью кольца (рис. 2.2). На кольце выделим малый участок длиной dl. Так как заряд $dq = \tau dl$ на этом участке можно считать точечным, напряженность $d\vec{E}$ электрического поля, создаваемого этим зарядом, может быть написана в виде

$$d\vec{E} = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r},$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, направленный от элемента dl к точке А.

Разложим вектор $d\vec{E}$ на две составляющие: dE_1, перпендикулярную плоскости кольца (сонаправленную с осью OZ), и dE_2, параллельную плоскости кольца (плоскости XOY), т.е.

$$d\vec{E} = d\overrightarrow{E_1} + d\overrightarrow{E_2}.$$

Напряженность электрического поля в точке А найдем интегрированием:

$$\vec{E} = \int_l \vec{E}_1 + \int_l \vec{E}_2,$$

где интегрирование ведется по всем элементам заряженного кольца.

Заметим, что для каждой пары зарядов dq и dq' $(dq = dq')$, расположенных симметрично относительно центра кольца, векторы $d\vec{E}_2$ и $d\vec{E}_2'$ в точке А равны по модулю и противоположны по направлению:

$$d\vec{E}_2 = -d\vec{E}_2.$$

Поэтому векторная сумма (интеграл)

$$\int_l d\vec{E}_2 = 0.$$

Составляющие $d\vec{E}_1$ для всех элементов кольца сонаправлены с осью OZ.

Тогда

$$E = \int dE_1;\ dE_1 = dE \cdot \cos\alpha;\ \cos\alpha = a / r.$$

Так как

$$dE = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 r^2}; \; r = \sqrt{R^2 + (R/2)^2} = \sqrt{5}R/2;$$

$$\cos\alpha = (R/2)/r = 1/\sqrt{5},$$

то

$$dE_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{4\tau}{5R^2\sqrt{5}} \cdot dl = \frac{\tau dl}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 \pi R^2}.$$

Таким образом,

$$E = \int_0^{2\pi R} \frac{\tau dl}{5\sqrt{5}\pi R^2 \varepsilon_0} = \frac{2\tau}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 \pi R}.$$

Из отношения $q = 2\pi R\tau$ определим радиус кольца:

$$R = q/(2\pi\tau).$$

Тогда

$$E = \frac{2\tau 2\pi\tau}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 q} = \frac{4\pi\tau^2}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 q}.$$

Произведем вычисления:

$$E = \frac{4 \cdot 3{,}14 \cdot \left(5 \cdot 10^{-8}\right)^2}{5\sqrt{5} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} \text{ В/м} = 7{,}92 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

Задача 2.3

Две концентрические проводящие сферы радиусами 6 и 10 см несут соответственно заряды $q_1 = 1$ и $q_2 = -0{,}5$ нКл. Найти напряженность поля в точках, отстоящих от центра сфер на расстояния $r_1 = 5$ см; $r_2 = 9$ см; $r_3 = 15$ см; считать $\varepsilon = 1$.

Дано:

$R_1 = 6$ см $= 0{,}06$ м;

$R_2 = 10$ см $= 0{,}1$ м;

$q_1 = 1$ нКл $= 1 \cdot 10^{-9}$ Кл;

$q_2 = -0{,}51$ нКл $= -5 \cdot 10^{-10}$ Кл;

$r_1 = 5$ см $= 0{,}05$ м;

$r_2 = 9$ см $= 0{,}09$ м;

$r_3 = 15$ см $= 0{,}15$ м.

$E_1 = ?\ E_2 = ?\ E_3 = ?$

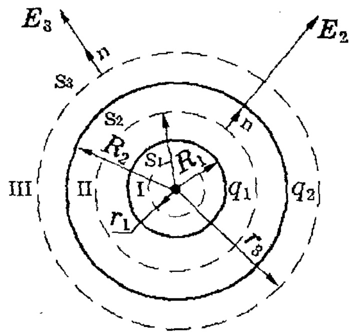

Рис. 2.3

Решение

Заметим, что точки, в которых требуется найти напряженности электрического поля, лежат в трех областях (рис. 2.3): области I ($r_1 < R_1$), области II ($R_1 < r_2 < R_2$), области III ($r_3 > R_2$). Для определения напряженности E_1 в области I проведем гауссову поверхность S_1 радиусом r_1 и воспользуемся теоремой Остроградского – Гаусса:

$$\oint_{S_1} E_1 dS = 0,$$

так как суммарный заряд, находящийся внутри гауссовой поверхности, равен нулю.

Из соображений симметрии $E_1 = \text{const}$. Следовательно, во всех точках, удовлетворяющих условию $r_1 < R_1$; $E_1 = 0$.

В области II проведем гауссову поверхность радиусом r_2. В этом случае

$$\oint_{S_2} E_2 dS = q_1 / \varepsilon_0,$$

т.к. внутри гауссовой поверхности находится только заряд q_1.

Так как $E_2 = \text{const}$, его можно вынести за знак интеграла:

$$E_2 \oint\limits_{S_2} dS = q_1 / \varepsilon_0;$$

$$ES_2 = q_1 / \varepsilon_0;$$

$$E_2 = q_1 / (\varepsilon_0 S_2),$$

где $S_2 = 4\pi r_2^2$ – площадь гауссовой поверхности.

Тогда

$$E_2 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}.$$

В области III проведем гауссову поверхность радиусом r_3. Обозначим напряженность E области III через E_3 и учтем, что в этом случае гауссова поверхность охватывает обе сферы и, следовательно, суммарный заряд будет равен $q_1 + q_2$.

Тогда

$$E_3 = \frac{q_1 + q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_3^2}.$$

Заметив, что $q_2 < 0$, это выражение можно переписать в виде

$$E_3 = \frac{q_1 - q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_3^2}.$$

Произведем вычисления:

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-9}}{(0{,}09)^2} \text{ В/м} = 1{,}11 \cdot 10^3 \text{ В/м};$$

$$E_3 = 9 \cdot 10^9 \frac{(1 - 0{,}5)10^{-9}}{(0{,}15)^2} \text{ В/м} = 200 \text{ В/м}.$$

Задача 2.4

На тонком стержне длиной l равномерно распределен заряд с линейной плотностью 10 нКл/м. Найти потенциал, созданный распределенным зарядом в точке, расположенной на оси стержня и удаленной от его ближайшего конца на расстояние L.

Дано:
$a = l$;
$\tau = 10$ нКл $=$
$= 1 \cdot 10^{-8}$ Кл.
$\varphi = ?$

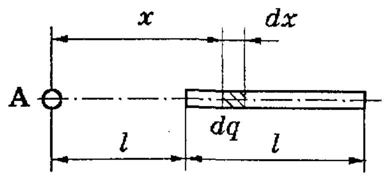

Рис. 2.4

Решение

В задаче рассматривается поле, создаваемое распределенным зарядом. В этом случае поступают следующим образом. На стержне выделяют малый участок длиной dx. Тогда на этом участке будет сосредоточен заряд $dq = \tau dx$, который можно считать точечным. Потенциал $d\varphi$, создаваемый этим точечным зарядом в точке А (рис. 2.4), можно определить по формуле

$$d\varphi = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 x} = \frac{\tau dx}{4\pi\varepsilon_0 x}.$$

Согласно принципу суперпозиции электрических полей, потенциал электрического поля, создаваемого заряженным стержнем в т. А, найдем интегрированием этого выражения:

$$\varphi = \int_l^{2l} \frac{\tau dx}{4\pi\varepsilon_0 x} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \int_l^{2l} \frac{dx}{x} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \ln x \Big|_l^{2l} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \ln 2.$$

Произведем вычисления:

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}693 \text{ В} = 62{,}4 \text{ В}.$$

Задача 2.5

Электрическое поле создано длинным цилиндром, равномерно заряженным с линейной плотностью 20 нКл/м. Определить разность потенциалов двух точек этого поля, находящихся на расстоянии 0,5 см и 2 см от поверхности цилиндра, в средней его части. Радиус цилиндра – 1 см.

Дано:

$R = 1$ см $= 0{,}01$ м;

$\tau = 20$ нКл/м $= 2 \cdot 10^{-8}$ Кл/м;

$a_1 = 0{,}5$ см $= 0{,}005$ м;

$a_2 = 2$ см $= 0{,}02$ м.

$\Delta\varphi = ?$

Решение

Для определения разности потенциалов воспользуемся соотношением между напряженностью поля и изменением потенциала: $E = -\text{град}\,\varphi$. Для поля с осевой симметрией, каким является поле цилиндра, это соотношение можно записать в виде

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}; \;\; d\varphi = -E dr.$$

Интегрируя это выражение, найдем разность потенциалов двух точек, отстоящих на расстояние r_1 и r_2 от оси цилиндра:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\int_{r_1}^{r_2} E dr.$$

Так как цилиндр длинный и точки взяты вблизи его средней части, для выражения напряженности поля можно воспользоваться формулой напряженности поля, создаваемого бесконечно длинным цилиндром:

$$E = \tau / (2\pi\varepsilon_0 r).$$

Подставив выражение E в предыдущую формулу, получим

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r} = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1},$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1}.$$

Произведем вычисления, учитывая, что $r_1 = R + a_1$; $r_2 = R + a_2$:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\cdot 10^{-8}\cdot 1{,}8\cdot 10^{10}\ln(3/1{,}5) = 250 \text{ В}.$$

Задача 2.6

Определить ускоряющую разность потенциалов, которую должен пройти в электрическом поле электрон, обладающий скоростью 10^6 м/с, чтобы скорость его возросла в 2 раза.

Дано:

$v_1 = 10^6$ м/с;

$n = v_2 / v_1 = 2.$

$\Delta\varphi = ?$

Решение

Ускоряющую разность потенциалов можно найти, вычислив работу A сил электрического поля. Эта работа определяется произведением элементарного заряда e на разность потенциалов $\Delta\varphi$:

$$A = e\Delta\varphi.$$

Работа сил электростатического поля в данном случае равна изменению кинетической энергии электрона:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

где m – масса электрона;

v_1, v_2 – его начальная и конечная скорости.

Приравняв правые части равенств, получим

$$e\Delta\varphi = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_1^2 n^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Отсюда – искомая разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{mv_1^2(n^2 - 1)}{2e}.$$

Произведем вычисления:

$$\Delta\varphi = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^6)^2}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} \cdot (2^2 - 1)\ \text{В} = 8{,}53\ \text{В}.$$

Задача 2.7

Конденсатор емкостью 3 мкФ был заряжен до разности потенциалов 40 В. После отключения от источника тока конденсатор соединили параллельно с другим незаряженным конденсатором емкостью 5 мкФ. Какая энергия израсходуется на образование искры в момент присоединения второго конденсатора?

Дано:

$C_1 = 3$ мкФ $= 3 \cdot 10^{-6}$ Ф;

$C_2 = 5$ мкФ $= 5 \cdot 10^{-6}$ Ф;

$U_1 = 40$ В.

$W = ?$

Решение

Энергия, израсходованная на образование искры:

$$W' = W_1 - W_2, \tag{2.1}$$

где W_1 – энергия, которой обладал первый конденсатор до присоединения к нему второго конденсатора;

W_2 – энергия, которую имеет батарея, составленная из двух конденсаторов.

Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле

$$W = \frac{CU^2}{2}, \tag{2.2}$$

где C – емкость конденсатора или батареи конденсаторов.

Выразив в формуле (2.1) энергии W_1 и W_2 по формуле (2.2) и приняв во внимание, что общая емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов, получим

$$W' = \frac{1}{2}\left[C_1U_1^2 - (C_1 + C_2)U_2^2\right], \tag{2.3}$$

где U_2 – разность потенциалов на зажимах батареи конденсаторов.

Учитывая, что заряд после присоединения второго конденсатора остался прежним, выразим разность потенциалов U_2 следующим образом:

$$U_2 = \frac{q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1U_1}{C_1 + C_2}. \tag{2.4}$$

Подставив выражение U_2 в (2.3), найдем

$$W' = \frac{C_1U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2)\cdot C_1^2U_1^2}{2\cdot(C_1 + C_2)^2} = \frac{C_1C_2U_1^2}{2\cdot(C_1 + C_2)}.$$

Произведем вычисления:

$$W' = \frac{3\cdot 10^{-6}\cdot 5\cdot 10^{-6}}{2\cdot(3\cdot 10^{-6}+5\cdot 10^{-6})}\cdot 1600\ \text{Дж} = 1{,}5\cdot 10^{-3}\ \text{Дж}.$$

Задача 2.8

Потенциометр сопротивлением 100 Ом подключен к батарее с ЭДС 150 В и внутренним сопротивлением 50 Ом. Определить: 1) показание вольтметра, соединенного с одной из клемм потенциометра и подвижным контактом, установленным посередине потенциометра (сопротивление вольтметра 500 Ом); 2) разность потенциалов между теми же точками потенциометра при отключении вольтметра.

Дано:

$R = 100$ Ом;

$\varepsilon = 150$ В;

$r_1 = 50$ Ом;

$r_2 = 500$ Ом.

$U_1 = ?$

$U_2 = ?$

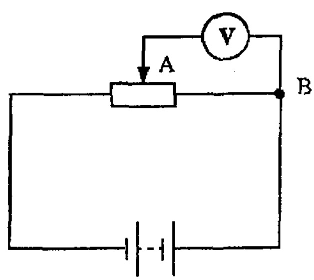

Рис. 2.5

Решение

Показание вольтметра, подключенного к точкам A и B (рис. 2.5), определим по формуле

$$U_1 = I_1 R_1,$$

где R_1 – сопротивление параллельно соединенных вольтметра и половины потенциометра;

I_1 – суммарный ток в ветвях этого соединения, или ток в неразветвленной части цепи.

Ток I_1 найдем по закону Ома для полной цепи:

$$I_1 = \varepsilon/(R_e + r_1), \tag{2.5}$$

где R_e – сопротивление внешней цепи. Это сопротивление есть сумма двух сопротивлений:

$$R_e = \frac{R}{2} + R_1. \tag{2.6}$$

Сопротивление R_1 найдем по формуле параллельного соединения проводников:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{r_2} + \frac{2}{R},$$

откуда

$$R_1 = \frac{Rr_2}{R + 2r_2}.$$

Подставив в (2.5) выражение R_e, по (2.6) найдем

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R/2 + R_1 + r_1}.$$

В данном случае решение в общем виде было бы громоздким. Поэтому удобно вычисление величин провести раздельно:

$$R_1 = \frac{100 \cdot 500}{100 + 2 \cdot 500} = 45{,}5 \text{ Ом};$$

$$I_1 = \frac{150}{50 + 45{,}5 + 50} = 1{,}03 \text{ А};$$

$$U_1 = 1{,}03 \cdot 45 \cdot 5 = 46{,}9 \text{ В}.$$

Разность потенциалов между точками A и B при отключенном вольтметре равна произведению величины тока на половину сопротивления потенциометра:

$$U_2 = I_2 \cdot \frac{R}{2}, \tag{2.7}$$

где I_2 – величина тока в цепи при отключенном вольтметре, определяемая по формуле

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R + r_1}.$$

Подставив I_2 в (2.7), найдем

$$U_2 = \frac{\varepsilon \cdot R}{2(R + r_1)}.$$

Произведем вычисления:

$$U_2 = \frac{150}{(100 + 50)} \cdot \frac{100}{2} = 50 \text{ В}.$$

Задача 2.9

Величина тока в проводнике сопротивлением 20 Ом нарастает в течение времени 2 с по линейному закону от 0 до 6 А (рис. 2.6). Определить теплоту, выделившуюся в этом проводнике за первую и вторую секунды.

Дано:

$R = 20$ Ом;

$t = 2$ с;

$I_1 = 0$ А;

$I_2 = 6$ А.

$Q_1 = ?$

$Q_2 = ?$

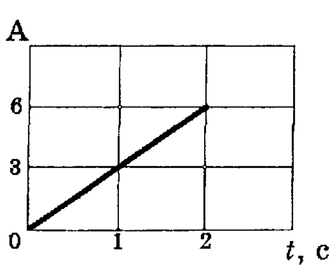

Рис. 2.6

Решение

Закон Джоуля – Ленца в виде $Q = I^2 Rt$ справедлив для постоянного тока (I = const). Если сила тока в проводнике изменяется, указанный закон справедлив для бесконечно малого интервала времени и записывается в виде

$$dQ = I^2 R dt, \tag{2.8}$$

где сила тока I является некоторой функцией времени. В данном случае

$$I = kt, \tag{2.9}$$

где k – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость изменения величины тока:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{6}{2} \text{ А/с} = 3 \text{ А/с}.$$

С учетом (2.9) формула (2.8) примет вид

$$dQ = k^2 R t^2 dt. \tag{2.10}$$

Для определения теплоты, выделившейся за конечный интервал времени Δt, выражение (2.10) надо проинтегрировать в пределах от t_1 до t_2:

$$Q = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt = \frac{1}{3} k^2 R \left(t_2^3 - t_1^3 \right).$$

Произведем вычисления:

$$Q_1 = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 \cdot (1 - 0) = 60 \text{ Дж};$$

$$Q_2 = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 \cdot (8 - 1) = 420 \text{ Дж}.$$

Задача 2.10

Электрическая цепь состоит из двух гальванических элементов, трех – сопротивлением 120, 52, 26 Ом, и гальванометра (рис. 2.7). В этой цепи гальванометр регистрирует ток 55 мА, идущий в направлении, указанном стрелкой. Определить ЭДС второго элемента, если ЭДС первого элемента равна 2 В. Сопротивлением гальванометра и внутренним сопротивлением элементов пренебречь.

Дано:

$R_1 = 120$ Ом;

$R_2 = 152$ Ом;

$R_3 = 26$ Ом;

$\varepsilon_1 = 2$ В;

$I_3 = 55$ мА.

$\varepsilon_2 = ?$

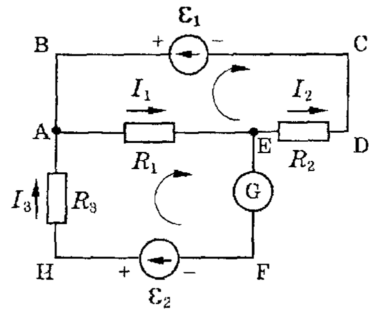

Рис. 2.7

Решение

Для расчета разветвленных цепей применяются законы Кирхгофа, на основании которых можно составить уравнения, необходимые для определения искомых величин (токов, сопротивлений и ЭДС). Применяя законы Кирхгофа, необходимо соблюдать следующие правила:

1. Перед составлением уравнений произвольно выбрать:

1) направления токов, если они не заданы в условии задачи (указать их стрелками на чертеже);

2) направления обхода контуров.

2. При составлении уравнений по 1-му закону Кирхгофа считать токи, подходящие к узлу, положительными, а токи, отходящие от узла, – отрицательными (число уравнений, составляемых по этому закону, должно быть на единицу меньше числа узлов, содержащихся в цепи).

3. При составлении уравнений по 2-му закону Кирхгофа надо считать, что:

1) падение напряжения на участке цепи (т.е. произведение I_iR_i) входит в уравнение со знаком плюс, если направление тока на данном участке совпадает с выбранным направлением обхода контура, и со знаком минус – в противном случае;

2) ЭДС входит в уравнение со знаком плюс, если она повышает потенциал в направлении обхода контура (т.е. при обходе приходится идти от минуса к плюсу внутри источника тока), и со знаком минус – в противном случае (число уравнений, которые могут быть составлены по 2-му закону Кирхгофа, должно быть меньше числа замкнутых контуров, имеющихся в цепи).

Для составления уравнений первый контур можно выбирать произвольно. Все последующие контуры следует выбирать таким образом, чтобы в каждый новый контур входила хотя бы одна ветвь цепи, не участвовавшая ни в одном из ранее использованных контуров. Если при решении уравнений указанным выше способом получены отрицательные значения силы тока или сопротивления, это означает, что ток через данное сопротивление в действительности течет в направлении, противоположном произвольно выбранному.

Выберем направления токов, как показано на рис. 2.7, и условимся обходить контуры в направлении, совпадающем с направлением движения часовой стрелки.

Согласно 1-му закону Кирхгофа, для узла E

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

По 2-му закону Кирхгофа для контура ABCDEA

$$-I_1R_1 - I_2R_2 = -\varepsilon_1, \tag{2.11}$$

или после умножения обеих частей равенства на –1

$$I_1R_1 + I_2R_2 = \varepsilon_1. \tag{2.12}$$

Соответственно для контура AEFHA:

$$I_1R_1 + I_3R_3 = \varepsilon_2. \tag{2.13}$$

После подстановки известных числовых значений в формулы (2.11)...(2.13) получим

$$I_1 - I_2 - 0,055 = 0;$$
$$120 \ \ I_1 + 52I_2 = 2;$$
$$120 \ \ I_1 + 0,055 \cdot 26 = \varepsilon_2.$$

Перенеся в этих уравнениях неизвестные величины в левые части, а известные – в правые, получим следующую систему уравнений:

$$I_1 - I_2 = 0,055;$$
$$60I_1 + 26I_2 = 1;$$
$$120I_1 - \varepsilon_2 = -1,1.$$

Эту систему уравнений с тремя неизвестными можно решить обычными приемами алгебры, но так как по условию задачи требуется определить только одно неизвестное из трех, воспользуемся методом определителей. Составим и вычислим определитель системы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 60 & 26 & 0 \\ 120 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -86.$$

Составим и вычислим определитель для величины ε_2:

$$\Delta\varepsilon_2 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0,055 \\ 60 & 26 & 1 \\ 120 & 0 & -1,1 \end{vmatrix} = -387.$$

Следовательно,

$$\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_2 / \Delta = 4,5 \text{ В}.$$

Задача 2.11

К пластинам плоского конденсатора приложено напряжение 250 В. Промежуток между пластинами облучается ультрафиолетовыми лучами. Гальванометр, включенный в цепь конденсатора, показывает ток $1{,}2 \cdot 10^{-9}$ А. Насыщения нет. Определить число пар ионов, находящихся в 1 м^3 воздуха (концентрацию ионов), если площадь каждой пластины равна $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м^2, а расстояние между ними – $3{,}1 \cdot 10^{-2}$ м. Подвижность положительных ионов равна $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^2/(В·с), отрицательных – $1{,}9 \cdot 10^{-4}$ м^2/(В·с).

Дано:

$U = 250$ В;

$I = 1{,}2 \cdot 10^{-9}$ А;

$S = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м^2;

$d = 3{,}1 \cdot 10^{-2}$ м;

$b_+ = 3{,}1 \cdot 10^{-4}$ м^2/Вс;

$b_- = 1{,}9 \cdot 10^{-4}$ м^2/Вс.

$n_0 = ?$

Решение

Плотность тока может быть выражена

$$j = qn_0(b_+ + b_-)E,$$

где q – заряд одного иона (принимаем его равным заряду электрона e);

n_0 – число ионов в 1 м^3;

$b_\pm$ – подвижность ионов;

E – напряженность поля; в случае однородного поля

$$E = \Delta\varphi / d,$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между пластинами конденсатора;

d – расстояние между пластинами.

С учетом выражения для E плотность тока

$$j = \frac{n_0 e(b_+ + b_-)\Delta\varphi}{d}. \tag{2.14}$$

С другой стороны,

$$j = I/S, \tag{2.15}$$

где I – сила тока;

S – площадь пластин.

Учитывая равенства (2.14) и (2.15), получим

$$n_0 = \frac{Id}{Se(b_+ + b_-)\Delta\varphi}. \tag{2.16}$$

Подставив числовые значения в формулу (2.16), получим

$$n_0 = 1{,}9 \cdot 10^{11}\ \text{м}^{-3}.$$

Контрольная работа №2

Таблица вариантов

№	Номера задач							
0	210	220	230	240	250	260	270	280
1	201	211	221	231	241	251	261	271
2	202	212	222	232	242	252	262	272
3	203	213	223	233	243	253	263	273
4	204	214	224	234	244	254	264	274
5	205	215	225	235	245	255	265	275
6	206	216	226	236	246	256	266	276
7	207	217	227	237	247	257	267	277
8	208	218	228	238	248	258	268	278
9	209	219	229	239	249	259	269	279

201. По тонкому полукольцу радиусом 12 см равномерно распределен заряд с линейной плотностью 10 нКл/м. Определить напряженность электрического поля, создаваемого распределенным зарядом в точке, совпадающей с центром полукольца.

202. Треть тонкого кольца радиусом 10 см несет равномерно распределенный заряд 30 нКл. Определить напряженность электрического поля в точке, совпадающей с центром кольца.

203. Заряд 2 мкКл равномерно распределен по тонкому полукольцу с линейной плотностью 0,01 мкКл/м. Какова напряженность электрического поля в точке, совпадающей с центром кольца?

204. На четверти тонкого кольца радиусом 10 см равномерно распределен заряд 20 нКл. Определить напряженность электрического поля, создаваемого этим зарядом в точке, совпадающей с центром кольца.

205. Две трети тонкого кольца радиусом 20 см несут равномерно распределенный заряд с линейной плотностью 0,1 мкКл/м. Вычислить напряженность электрического поля в точке, совпадающей с центром кольца.

206. Для очистки газа от примесей его можно пропустить через тонкое заряженное кольцо. Пусть по такому кольцу радиусом 10 см равномерно распределен заряд с линейной плотностью 0,3 мкКл/м. Определить напряженность электрического поля, создаваемого заряженным кольцом, в точке, находящейся на оси кольца на расстоянии $2R$ от его центра.

207. Тонкий длинный стержень равномерно заряжен с линейной плотностью 1,5 нКл/см. На продолжении оси стержня на расстоянии 12 см от его конца находится точечный заряд 0,2 мкКл. Определить силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.

208. Тонкий стержень длиной 20 см несет равномерно распределенный заряд 0,1 мкКл. Определить напряженность электрического поля, создаваемого распределенным зарядом в точке, лежащей на оси стержня на расстоянии 20 см от его конца.

209. По тонкому полукольцу радиусом 10 см равномерно распределен заряд с линейной плотностью 2 мкКл/м. Определить напряженность электрического поля, создаваемого распределенным зарядом в точке, совпадающей с центром кольца.

210. Треть тонкого кольца радиусом 10 см несет равномерно распределенный заряд 50 нКл. Определить напряженность электрического поля, создаваемого распределенным зарядом в точке, совпадающей с центром кольца.

211.На двух концентрических сферах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями 4σ и σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность в точках, удаленных от центра на расстояния $0{,}5R$ и $1{,}5R$. Принять $\sigma = 20$ нКл/м^2 (рис. 2.8).

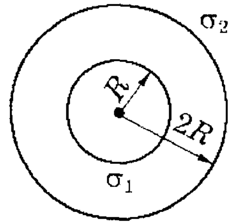

Рис. 2.8

212. На двух концентрических сферах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями -4σ и σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность в точках, удаленных от центра на расстояния $0{,}5R$ и $3R$. Принять $\sigma = 30$ нКл/м^2 (см. рис. 2.8.)

213. На двух концентрических сферах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями $-\sigma$ и σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность в точках, удаленных от центра на расстояния $0{,}5R$ и $2{,}5R$. Принять $\sigma = 0{,}2$ мкКл/м^2 (см. рис. 2.8).

214. На двух концентрических сферах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями -2σ и σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность в точках, удаленных от центра на расстояния $1{,}2R$ и $4R$. Принять $\sigma = 0{,}3$ мкКл/м^2 (см. рис. 2.8).

215. На двух бесконечно параллельных плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями 2σ и σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса и принцип суперпозиции электрических полей, вычислить напряженность поля в точке, расположенной слева от плоскостей, и в точке, находящейся между плоскостями. Принять $\sigma = 60$ нКл/м^2.

216. На двух бесконечно параллельных плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями -4σ и 2σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса и принцип суперпозиции электрических полей, вычислить напряженность поля в точке, расположенной слева от плоскостей, и в точке, находящейся между плоскостями. Считать $\sigma = 40$ нКл/м^2.

217. На двух бесконечно параллельных плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями σ и -2σ. Используя теорему Остроградского-Гаусса и принцип суперпозиции электрических полей, вычислить напряженность поля в двух точках, одна из которых расположена слева от плоскостей, а вторая – справа. Считать $\sigma = 10$ нКл/м^2.

218. На двух коаксиальных бесконечных цилиндрах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями -2σ и σ (рис. 2.9). Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность поля в точке, удаленной на расстояние $1{,}5R$. Считать $\sigma = 10$ нКл/м^2.

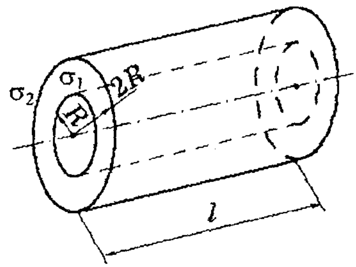

Рис. 2.9

219. На двух коаксиальных бесконечных цилиндрах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями σ и $-\sigma$ (см. рис. 2.9). Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность поля в точке, удаленной на расстояние $3R$. Считать $\sigma = 50$ нКл/м^2.

220. На двух коаксиальных бесконечных цилиндрах радиусами R и $2R$ равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями $-\sigma$ и 4σ (см. рис. 2.9). Используя теорему Остроградского-Гаусса, вычислить напряженность поля в точке, удаленной на расстояние $6R$. Считать $\sigma = 60$ нКл/м^2.

221. К двум последовательно соединенным конденсаторам (расстояние между пластинами каждого – 3 мм) подано напряжение 36 кВ. Произойдет ли пробой в конденсаторах, если к одному из них параллельно подключить такой же конденсатор? Пробой в масле наступает при напряженности 7 кВ/мм.

222. Электролитические конденсаторы емкостями 50 мкФ и 100 мкФ, у которых диэлектриком является оксидная алюминиевая пленка толщиной 10 мк, заряжены до напряжений 100 В и 300 В соответственно. Определить напряжения на обкладках конденсаторов после того, как их разноименные обкладки соединят проводником. Проверить, не будут ли пробиты конденсаторы, если пробой пленки наступает при напряженности электрического поля выше 30 кВ/мм.

223. Конденсатор емкостью 666 пФ зарядили до разности потенциалов 1,5 кВ и отключили напряжение. Затем к конденсатору подсоединили параллельно второй, незаряженный, конденсатор емкостью 444 пФ. Рассчитать энергию, которая пошла на образование искры, проскочившей при соединении конденсатора.

224. Энергия плоского заполненного диэлектриком конденсатора после зарядки равна $2 \cdot 10^{-5}$ Дж. Конденсатор отключили от источника. Вынимая диэлектрик, совершили работу $8 \cdot 10^{-5}$ Дж. Найти относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика.

225. Шарики радиусами по 1 см имеют заряды 30 нКл и –20 нКл. Найти энергию, которая выделится при разряде, если шарики соединить проводником.

226. Плоский конденсатор с площадью пластин 200 см^2 каждая заряжен до разности потенциалов 2 кВ. Расстояние между пластинами – 2 см. Диэлектрик – стекло. Определить энергию и объемную плотность энергии электрического поля конденсатора.

227. При максимальной емкости 100 пФ конденсатора настройки радиоприемника его зарядили до напряжения 300 В. Какую работу нужно совершить, чтобы установить на конденсаторе минимальную емкость 10 пФ (источник отключен)?

228. Основной частью устройства, контролирующего уровень непроводящей жидкости, является конденсатор, вертикально расположенные пластины которого погружены в жидкость. Во сколько раз изменилось показание гальванометра G (рис. 2.10), измеряющего величину заряда, если перед началом измерений сосуд был пуст, а затем конденсатор заполнился на половину высоты жидкостью с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 7$?

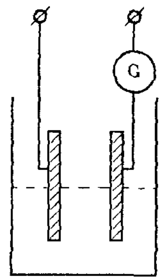

Рис. 2.10

229. Конденсатор емкостью 50 мкФ заряжен до напряжения 100 В, а конденсатор емкостью 60 мкФ – до напряжения 200 В. Какое напряжение установится на обкладках конденсаторов, если их соединить обкладками, имеющими одноименные заряды?

230. Каковы заряд и напряжение на конденсаторе C_1 в схеме на рис. 2.11, если напряжение в цепи – 300 В; C_1 = 4 мкФ; C_2 = 6 мкФ; C_3 = 5 мкФ?

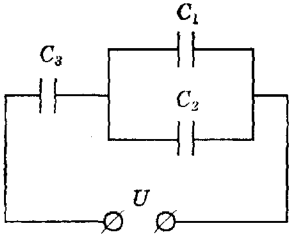

Рис. 2.11

231. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобрел скорость 10^4 м/с. Расстояние между пластинами – 9 мм. Найти: 1) разность потенциалов между пластинами; 2) поверхностную плотность заряда на пластинах.

232. Пылинка массой 10^{-5} кг, имеющая в избытке 20 электронов, прошла в вакууме ускоряющую разность потенциалов 2 МВ. Какова кинетическая энергия *T* пылинки? Какую скорость она приобрела?

233. В установках для улавливания пыли пропускают воздух через металлические трубы, по оси которых протягивается длинная тонкая металлическая проволока. Проволока несет равномерно распределенный заряд 0,001 мкКл/м. Определить величину кинетической энергии электрона в точке 2, если в точке 1 его кинетическая энергия равна 200 эВ (рис. 2.12).

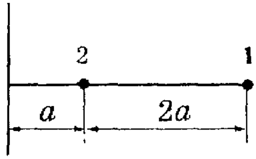

Рис. 2.12

234. В электронно-лучевой трубке осциллографа электроны ускоряются, двигаясь в электрическом поле. В некоторой точке поля с потенциалом 600 В электрон имел скорость 20 Мм/с. Определить потенциал точки поля, дойдя до которой, электрон увеличит свою скорость вдвое.

235. Два точечных заряда 60 нКл и 30 нКл находятся на расстоянии 30 см друг от друга. Какую работу необходимо совершить внешними силами, чтобы уменьшить вдвое расстояние между зарядами?

236. Электрическое поле создано заряженным металлическим шаром, потенциал которого – 250 В. Определить работу сил поля по перемещению заряда 0,4 мкКл из точки 1 в точку 2 (рис. 2.13).

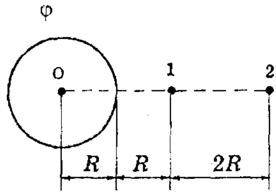

Рис. 2.13

237. Диполь с электрическим моментом 20 нКл·м свободно установился в однородном электрическом поле напряженностью 100 кВ/м. Определить величину работы внешних сил, которую необходимо совершить, чтобы повернуть диполь на угол 60°.

238. Разность потенциалов между катодом и анодом электронной лампы равна 90 В, расстояние – 1 мм. С каким ускорением движется электрон от катода к аноду? Какова скорость электрона в момент удара об анод? Поле считать однородным.

239. Для очистки воздуха от дыма могут применяться электрофильтры, создающие электростатическое поле внутри тонкого металлического кольца. Кольцо фильтра заряжено с линейной плотностью 300 нКл/м и имеет радиус 10 см. Определить потенциал в точке, расположенной на оси кольца на расстоянии 20 см от его центра.

240. Тонкая квадратная рамка равномерно заряжена с линейной плотностью заряда 300 пКл/м. Определить потенциал поля в точке пересечения диагоналей.

241. На рис. 2.14 дана схема уровнемера, применяемого для измерения уровня бензина в баке автомобиля. Реостат сопротивлением 120 Ом может изменять ток в цепи от 9 до 45 мА. Найти величину постоянного сопротивления цепи *R* и пределы изменения напряжения на нем. Внутренним сопротивлением источника тока можно пренебречь.

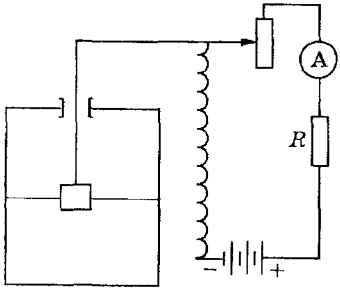

Рис. 2.14

242. От генератора с напряжением на клеммах 40 В энергия поступает по медному кабелю сечением 170 мм^2 к месту электросварки, удаленному от генератора на 50 м. Определить напряжение на сварочном аппарате, если сила тока в цепи равна 200 А.

243. Для лабораторной установки требуется изготовить нагреватель мощностью 0,5 кВт, предназначенный для включения в цепь напряжением 220 В. Сколько (в метрах) нужно взять для этого нихромовой проволоки диаметром 0,4 мм? Удельное сопротивление нихрома в нагретом состоянии $1{,}05 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

244. Салон троллейбуса освещается 15 лампами, рассчитанными на напряжение 120 В. Составить схему включения ламп в сеть троллейбуса, напряжение в которой – 600 В. Что произойдет, если одна из ламп перегорит? Будут ли гореть остальные лампы, если водитель вместо перегоревшей лампы поставит проволочную перемычку? Изменится ли накал ламп? Ответ обосновать.

245. Электроплитка с регулируемым нагревом имеет две спирали сопротивлением 60 Ом и 120 Ом, напряжение в сети – 220 В. Как нужно соединить эти спирали, чтобы получить максимальную мощность? Чему равна эта мощность?

246. При силе тока 10 А во внешней цепи выделяется мощность 200 Вт, при силе тока 15 А – 270 Вт. Каковы внутреннее сопротивление, ЭДС и сила тока короткого замыкания генератора?

247. На цоколе электрической лампочки написано «220 В, 100 Вт». В процессе работы из-за испарения и рассеяния металла спираль лампочки становится тоньше. Какова будет мощность лампочки, если диаметр волоска спирали уменьшится на 10%?

248. От трансформатора напряжением 600 В нужно передать потребителю мощность 9 кВт на некоторое расстояние. Каково должно быть сопротивление линии передач, чтобы потери мощности в ней не превышали 10%?

249. Электрическая лампочка с вольфрамовой нитью потребляет мощность 50 Вт. Температура нити при горении лампочки 2500 °С. Какую мощность будет потреблять лампочка в первый момент после ее включения в сеть при температуре 20 °С? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ 1/град. Объяснить, когда лампочка перегорает чаще: в момент включения или в процессе горения?

250. Радиолокационная станция (РЛС) работает при напряжении 115 В, питаясь от генератора, который находится на расстоянии 30 метров. Определить мощность РЛС, если сечение медных проводов, из которых сделана подводка, – 3,4 мм^2, а падение напряжения на ней составляет 5% от напряжения на клеммах РЛС.

251. Найти величину тока в каждой ветви мостика Уитстона и сопротивление R_4 (рис. 2.15). Сопротивления R_1 = 28 Ом; R_2 = 47 Ом; R_3 = 230 Ом. Ток, идущий через гальванометр, равен нулю. Ток через источник – 0,04 А. Сопротивлением источника тока пренебречь.

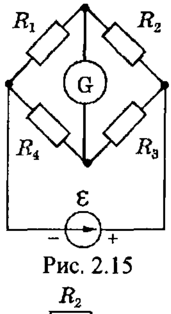

Рис. 2.15

252. Найти величины токов во всех участках цепи (рис. 2.16), если ЭДС источника тока $\varepsilon_1 = 20$ В; $\varepsilon_2 = 35$ В; внутренние сопротивления r_1 = 0,2 Ом; r_2 = 0,5 Ом; сопротивления R_1 = 0,8 Ом; R_2 = 3 Ом.

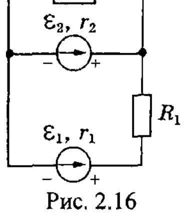

Рис. 2.16

253. Найти величины токов во всех участках цепи (рис. 2.17), если ЭДС источника тока $\varepsilon_1 = 74$ В; $\varepsilon_2 = 25$ В; $R_1 = 50$ Ом; $R_2 = R_3 = 8$ Ом. Внутренним сопротивлением источников тока пренебречь.

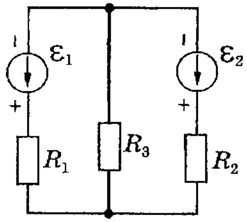

Рис. 2.17

254. Найти величины токов во всех участках цепи (рис. 2.18), если ЭДС источника тока $\varepsilon_1 = 5{,}2$ В; $\varepsilon_2 = 4{,}8$ В; $R_1 = 1{,}1$ Ом; $R_2 = 0{,}5$ Ом; $R_3 = 2{,}2$ Ом. Внутренним сопротивлением источников тока пренебречь.

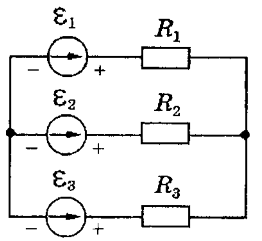

Рис. 2.18

255. Найти величину тока через сопротивление R_3, если $R = 1{,}7$ Ом; $R = 2{,}75$ Ом; $R_4 = 2{,}25$ Ом; $R_5 = 3{,}3$ Ом; ЭДС источников тока одинаковы и равны 1 В (рис. 2.19).

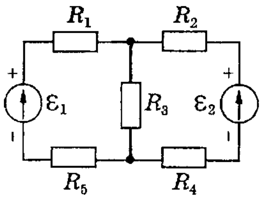

Рис. 2.19

256. В цепи (рис. 2.20) ЭДС источника тока равны 4,5 В; внутреннее сопротивление источника тока $r = 0{,}5$ Ом; $R_1 = 1{,}2$ Ом; $R_2 = 4$ Ом; $R_3 = 9$ Ом. Найти величины токов в отдельных сопротивлениях.

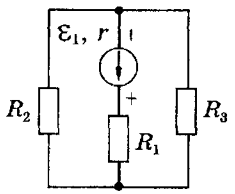

Рис. 2.20

257. Найти величины токов (рис. 2.21) в сопротивлениях R_1 и R_2 и ЭДС источника тока, если $R_1 = 1{,}2$ Ом; $R_2 = 1{,}5$ Ом; $R_3 = 0{,}5$ Ом; $I_3 = 0{,}9$ А. Внутреннее сопротивление источника 0,2 Ом.

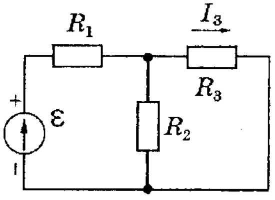

Рис. 2.21

258. Найти величину тока (рис. 2.22), проходящего через каждый источник ЭДС, если внутренние сопротивления их одинаковы и равны 0,2 Ом; $\varepsilon_1 = 1,5$ В; $\varepsilon_2 = 1,3$ В; $\varepsilon_3 = 1,2$ В; $R = 0,7$ Ом.

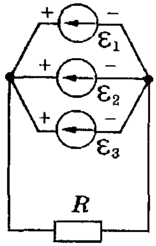

Рис. 2.22

259. Найти величину тока (рис. 2.23), текущего через источник тока, если $\varepsilon = 4,5$ В; внутреннее сопротивление источника 0,2 Ом; $R_1 = 2$ Ом; $R_2 = 4$ Ом; $R_3 = 3,5$ Ом; $R_4 = 1,5$ Ом.

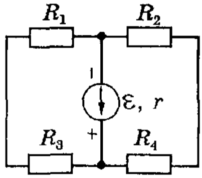

Рис. 2.23

260. Найти величины токов во всех участках цепи (рис. 2.24), если $\varepsilon_1 = 7,5$ В; $\varepsilon_2 = 2,5$ В; $\varepsilon_3 = 9$ В; $R_1 = 3,4$ Ом; $R_2 = 4,7$ Ом; $R_3 = 1,8$ Ом. Внутренним сопротивлением источников тока пренебречь.

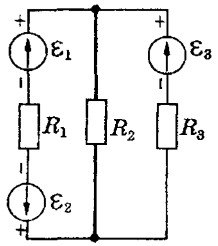

Рис. 2.24

261. Ток, питающий электрическую дугу, равен 500 А, напряжение на электродах – 40 В. Определить величину электроэнергии, затраченной на сварку одного километра труб, если скорость сварки – 0,01 м/с, длина всех швов – 180 м.

262. В однородную цепь лампы включен линейный элемент (имеющий постоянное сопротивление). Вращением ручки потенциометра увеличили равномерно в течение 5 с анодный ток от 100 мА до 1 А. При этом на линейном элементе выделилось количество теплоты 148 Дж. Определить сопротивление линейного элемента.

263. Двигатель электрокара имеет мощность 2 кВт и работает от аккумулятивной батареи напряжением 80 В. При включении двигателя ток в нем равномерно нарастает до максимального значения в течение 6 с. Какое количество теплоты выделяется за это время в обмотках двигателя?

264. За время 10 с при равномерно возрастающей силе тока от нуля до некоторого максимума в проводнике выделилось количество теплоты 75 кДж. Определить среднюю силу тока в проводнике, если его сопротивление – 25 Ом.

265. Какое количество теплоты выделилось за время 10 с в проводнике сопротивлением 10 Ом, ток в котором равномерно уменьшался за это время от 10 А до 0?

266. За 10 с при равномерно возраставшей силе тока в проводнике сопротивлением 10 Ом выделилось количество теплоты 800 Дж. Определить заряд, проходящий за это время в проводнике, если начальный ток равен нулю.

267. Равномерным вращением ручки реостата в течение 3 с ток в цепи увеличили от 1 до 4 А. При этом в проводнике, включенном в цепь, выделилось количество теплоты 5 кДж. Каково сопротивление проводника?

268. Электрический чайник закипает через 15 минут после его включения. Нагревательный элемент чайника намотан из 6 метров проволоки. Как переделать этот нагревательный элемент, чтобы чайник закипал через 10 мин? Потерями тепла пренебречь.

269. Ток в цепи изменяется по закону $I = I_0 \sin\omega t$. Какое количество теплоты выделится в проводнике сопротивлением 20 Ом за время, равное половине периода, если период равен 10 с; $I_0 = 2$ А?

270. По проводу сопротивлением 6 Ом протекло количество электричества 30 Кл. Определить количество теплоты, выделенное в проводе, в следующих случаях: 1) по проводу протекал постоянный ток в течение 24 с; 2) ток в проводе равномерно убывал до нуля в течение 24 с.

271. Наибольшее номинальное значение тока плавких вставок предохранителей для изолированных проводов сечением 1 мм^2 составляет 10 А (в жилых домах). Определить скорость дрейфа электронов в таких проводах при этом токе. Считать, что в каждом 1 см^3 провода содержится $2{,}5 \cdot 10^{22}$ свободных электронов.

272. Два соединенных последовательно провода из одного материала имеют разное сечение, причем диаметр одного в 2 раза больше, чем другого. Найти отношение скоростей дрейфа электронов в этих проводах.

273. На концах серебряного проводника длиной 30 см поддерживается разность потенциалов 0,3 В. Определить скорость дрейфа электронов. Концентрация свободных электронов в серебре – $5{,}6\cdot10^{28}$ м$^{-3}$; удельное сопротивление серебра – $1{,}6\cdot10^{-8}$ Ом·м.

274. Какова скорость дрейфа в медном проводнике диаметром 4 мм, по которому к стартеру автомобиля подводится ток в 100 А? Концентрация электронов в меди – $8{,}4\cdot10^{28}$ м$^{-3}$.

275. Пары ртути в лампе ионизируются рентгеновскими лучами. При увеличении напряжения между электродами лампы ток достигает насыщения при значении 0,8 мА. Какое количество пар ионов создают рентгеновские лучи за время 1 с?

276. Допустимая токовая нагрузка на одножильном медном кабеле сечением 1,5 мм^2 составляет 30 А. Определить, сколько тепла выделится ежесекундно в каждом 1 мм^3 проводника.

277. Для регистрации γ-излучения используется ионизационная камера с плоскими электродами. Ток, текущий через камеру, равен 7,2 мА. Площадь каждого электрода – 200 см^2; расстояние между ними – 2 см; разность потенциалов – 300 В. Найти концентрацию пар ионов между пластинами, если ток далек от насыщения. Подвижность положительных ионов – 1,4 см^2/(В·с), отрицательных – 1,9 см^2/(В·с). Заряд каждого иона равен элементарному заряду.

278. Азот ионизируется рентгеновским излучением. Определить удельную проводимость азота, если в каждом 1 см^3 газа находится в равновесии 10^7 пар ионов. Подвижность положительных ионов – 1,27 см^2/(В·с), отрицательных – 1,81 см^2/(В·с).

279. Объем газа, заключенного между электродами ионизационной камеры, равен 300 дм^3. Газ ионизируется рентгеновским излучением. Величина тока насыщения – 5 нА. Сколько пар ионов образуется в 1 с в 1 см^3 газа? Ионы – однозарядные.

280. Расстояние между плоскими электродами в ионизационной камере – 3 см, пространство между электродами ионизируется α-частицами, что приводит к возникновению тока насыщения плотностью 15 мкА/м^2. Определить число пар однозарядных ионов, которые создают влетающие в камеру частицы в каждом 1 см^3 пространства камеры в 1 с.

3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Примеры решения задач

Задача 3.1

По проводнику, изогнутому в виде прямоугольника со сторонами 20 и 10 см, течет ток силой 100 А. Найти магнитную индукцию в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

Дано:

$a = 20$ см;

$b = 10$ см;

$I = 100$ А.

$B = ?$

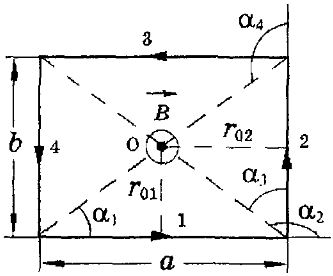

Рис. 3.1

Решение

Расположим виток в плоскости чертежа (рис. 3.1).

Согласно принципу суперпозиции магнитных полей,

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4, \tag{3.1}$$

где $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3, \vec{B}_4$ – магнитные индукции полей, создаваемых токами, притекающими по каждой стороне прямоугольника.

В точке О пересечения диагоналей прямоугольника все векторы магнитной индукции направлены перпендикулярно плоскости витка «к нам». Кроме того, из соображений симметрии следует, что

$$B_1 = B_2;\ B_3 = B_4.$$

Это позволяет векторное равенство (3.1) заменить скалярным:

$$B = 2B_1 + 2B_2. \tag{3.2}$$

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком 1 прямоугольного проводника с током, равна

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_{01}}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right). \qquad (3.3)$$

Учитывая, что $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$ и $\cos\alpha_2 = -\cos\alpha_1$, формулу (3.3) можно переписать в виде

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_{01}}\cos\alpha_1. \qquad (3.4)$$

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком 2 прямоугольного проводника с током, будет равна

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_{02}}\left(\cos\alpha_3 - \cos\alpha_4\right). \qquad (3.5)$$

С учетом того, что $\cos\alpha_4 = -\cos\alpha_3$, формула (3.5) приобретает вид

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_{02}}\cos\alpha_3 . \qquad (3.6)$$

Заметив, что

$$r_{01} = \frac{b}{2};\ r_{02} = \frac{a}{2};\ \cos\alpha_1 = \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}};\ \cos\alpha_2 = \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}},$$

получим

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{\pi}\cdot\frac{a}{B\sqrt{a^2+b^2}};\ B_2 = \frac{\mu_0 I}{\pi}\cdot\frac{b}{a\sqrt{a^2+b^2}}. \qquad (3.7)$$

С учетом (3.7) формула (3.2) приобретает вид

$$B = \frac{2\mu_0 I}{\pi\sqrt{a^2+b^2}} \cdot \left(\frac{a}{b}+\frac{b}{a}\right). \qquad (3.8)$$

После подстановки числовых значений найдем величину магнитной индукции в точке О:

$$B = \frac{2\cdot 4\cdot 3{,}14\cdot 10^{-7}\cdot 100}{3{,}14\sqrt{0{,}2^2+0{,}1^2}}\left(\frac{0{,}2}{0{,}1}+\frac{0{,}1}{0{,}2}\right) = 8{,}94\cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Задача 3.2

Бесконечно длинный провод изогнут так, как это изображено на рис. 3.2. Радиус дуги окружности равен 10 см. Определить магнитную индукцию поля, создаваемого в точке О током 100 А, текущим по этому проводу.

Дано:

$R = 10$ см;

$I = 100$ А.

$B = ?$

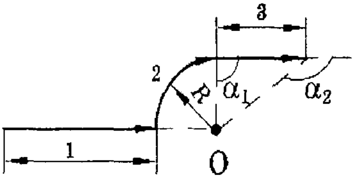

Рис. 3.2

Решение

В соответствии с принципом суперпозиции, индукция магнитного поля в точке О равна

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3,$$

где B_1, B_3 – индукции магнитных полей, создаваемых током, протекающим по проводам 1 и 3;

B_2 – индукция магнитного поля части окружности радиусом R.

Так как точка О лежит на оси провода, $B_1 = 0$;

$$\vec{B} = \vec{B}_2 + \vec{B}_3. \tag{3.9}$$

В точке О векторы индукции $\vec{B}_2$ и $\vec{B}_3$ направлены перпендикулярно плоскости «от нас». По этой причине векторное равенство (3.9) можно заменить скалярным:

$$B = B_2 + B_3. \tag{3.10}$$

Магнитное поле B_2 в точке О создается четвертой частью кругового тока, поэтому

$$B_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{1}{8} \cdot \frac{\mu_0 I}{R}. \tag{3.11}$$

Магнитную индукцию проводника B_3 найдем по формуле

$$B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \tag{3.12}$$

где $\alpha_1 = \dfrac{\pi}{2}$; $\alpha_2 = -\pi$; $\cos\alpha_2 = -1$.

С учетом формул (3.11), (3.12) формула (3.10) принимает вид

$$B = \frac{1}{8}\frac{\mu_0 I}{R} + \frac{\mu_0 I}{4\pi R} = \frac{\mu_0 I}{R}\left(\frac{1}{8} + \frac{1}{4\pi}\right).$$

Произведем вычисления:

$$B = \frac{4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7} \cdot 100}{0{,}1}\left(\frac{1}{8} + \frac{1}{4 \cdot 3{,}14}\right) = 2{,}57 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}.$$

Задача 3.3

По тонкому стержню длиной 20 см равномерно распределен заряд 300 нКл. Стержень вращается с частотой 10 с$^{-1}$ относительно оси, проходящей перпендикулярно стержню через его середину. Масса стержня – 10 г. Определить: 1) магнитный момент, обусловленный вращением заряженного стержня; 2) момент импульса стержня относительно центра вращения; 3) отношение $\frac{P_m}{L}$.

Дано:

$l = 20$ см;

$Q = 300$ нКл $= 3 \cdot 10^{-7}$ Кл;

$\nu = 10$ с$^{-1}$;

$m = 10$ г $= 0{,}01$ кг.

$P_m = ?$

$L = ?$

$\frac{P_m}{L} = ?$

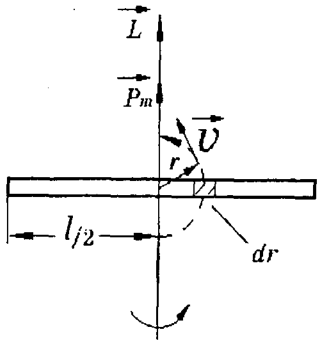

Рис. 3.3

Решение

Движение каждого заряженного элемента длины стержня dr эквивалентно круговому току, равному

$$dI = \nu dq, \tag{3.12}$$

где ν – частота вращения;

dq – заряд элемента dr.

Величина dq равна

$$dq = \frac{Q}{l} dr. \tag{3.13}$$

Магнитный момент контура с током выражается формулой

$$\vec{P}_m = IS\vec{n}\,, \tag{3.14}$$

где S – площадь, охватываемая током I;

$\vec{n}$ – единичный вектор нормали к площади контура.

При направлении вращения стержня, указанном на рис. 3.3, магнитные моменты dP_m каждого элемента стержня направлены вверх, поэтому векторное суммирование величин dP_m можно заменить алгебраическим.

На основании формул (3.12)...(3.14) получим

$$d\vec{P}_m = \frac{Q}{l}\nu r^2 \pi dr\vec{n}\,. \tag{3.15}$$

После интегрирования (3.15) получим

$$P_m = 2\int\limits_0^{l/2} \frac{Q}{l}\nu\pi r^2 dr = \frac{2}{3}\cdot\frac{Q}{l}\pi\nu\left(\frac{l}{2}\right)^3 = \frac{1}{12}Q\pi\nu l^2\,. \tag{3.16}$$

Момент импульса элемента dr, движущегося со скоростью v, равен

$$\overrightarrow{dL} = \left[\vec{r}, \vec{\text{v}}\cdot dm\right], \tag{3.17}$$

где dm – масса элемента длины стержня, равная

$$dm = \frac{m}{l}dr\,. \tag{3.18}$$

В силу того, что направления величин $\overrightarrow{dL}$ для всех элементов одинаковы и направлены вверх, окончательно для момента импульса стержня в целом можно записать:

$$L = \int dL;\ L = 2\int\limits_0^{l/2}\frac{m}{l}\cdot rv\cdot dr\,. \tag{3.19}$$

Учитывая, что $v = \omega R = 2\pi\nu r$, получим

$$L = \frac{m}{6}\pi\nu l^2. \qquad (3.20)$$

В соответствии с формулами (3.16), (3.20) отношение величин $\frac{P_m}{L}$ равно

$$\frac{P_m}{L} = \frac{Q}{2m}. \qquad (3.21)$$

В векторной форме искомое отношение принимает вид

$$\frac{\vec{P}_m}{\vec{L}} = \frac{Q}{2m}. \qquad (3.22)$$

Произведем вычисления:

$$P_m = \frac{1}{12}\cdot 300\cdot 10^{-9}\cdot 3{,}14\cdot 10\cdot 0{,}2^2 = 3{,}14\cdot 10^{-8}\ \text{А}\cdot\text{м}^2;$$

$$L = \frac{1}{6}\cdot 0{,}01\cdot 3{,}14\cdot 10\cdot 0{,}2^2 = 2{,}09\cdot 10^{-3}\ \text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1};$$

$$\frac{P_m}{L} = \frac{300\cdot 10^{-9}}{2\cdot 0{,}01} = 1{,}5\cdot 10^{-5}\ \text{Кл}\cdot\text{кг}^{-1}.$$

Задача 3.4

Электрон, ускоренный разностью потенциалов 6 кВ, влетает в однородное магнитное поле под углом 30° к направлению поля и начинает двигаться по спирали. Магнитная индукция магнитного поля – $1{,}3\cdot 10^{-2}$ Тл. Найти: 1) радиус витка; 2) шаг спирали.

Дано:

$U = 6$ кВ $= 6 \cdot 10^3$ В;

$B = 1{,}32 \cdot 10^{-2}$ Тл;

$\alpha = 30^0$;

$m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг;

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

$R = ?$

$h = ?$

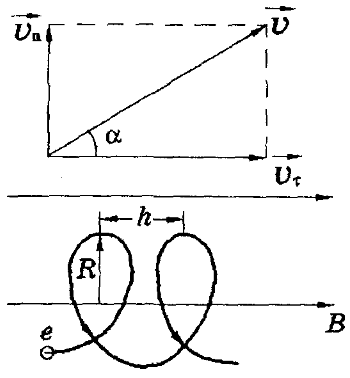

Рис. 3.4

Решение

Разложим скорость движения электрона на две составляющие: υ_n – составляющую, направленную перпендикулярно силовым линиям; υ_τ – составляющую, направленную вдоль силовых линий. Сила Лоренца, действующая на электрон, в скалярном виде имеет вид

$$F_л = e\upsilon B \sin\alpha = eB\upsilon_n, \tag{3.23}$$

где $\upsilon_n = \upsilon \sin\alpha$;

$\upsilon_\tau = \upsilon \cos\alpha$;

e – заряд электрона.

Из (3.23) следует, что сила Лоренца зависит от составляющей $\upsilon_n \perp B$, под действием которой частица движется по окружности.

По 2-му закону Ньютона

$$F_л = ma_n;$$

$$e\upsilon_n B = m\frac{\upsilon_n^2}{R}, \tag{3.24}$$

где m, a_n – соответственно масса и нормальное ускорение электрона.

Из формулы (3.24) находим радиус:

$$R = \frac{mv_n}{eB} = \frac{mv\sin\alpha}{eB}. \quad (3.25)$$

Вторая составляющая скорости направлена вдоль силовых линий магнитного поля и способствует движению электрона в этом же направлении. В результате участия электрона одновременно в двух видах движения – по окружности в плоскости, перпендикулярной силовым линиям, и параллельно силовым линиям – траекторией его движения является спираль. Радиус спирали определяется формулой (3.25). Шаг спирали h равен тому расстоянию, на которое сместится электрон вдоль силовой линии за время, равное периоду обращения электрона T:

$$T = \frac{2\pi R}{\upsilon_n} = \frac{2\pi m}{eB};$$

$$h = \upsilon_\tau \cdot T = \frac{2\pi m\upsilon\cos\alpha}{eB}, \quad (3.26)$$

т.к. $\upsilon_\tau = v\cos\alpha$.

Скорость электрона, влетающего в магнитное поле, связана с ускоряющей разностью потенциалов U соотношением

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU;$$

$$\upsilon v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (3.27)$$

Подставив выражение v в формулы (3.25) и (3.26), найдем

$$R = \frac{\sin\alpha}{B}\sqrt{\frac{2mU}{l}};$$
$$h = \frac{2\pi\cos\alpha}{B}\sqrt{\frac{2m}{l}U}. \tag{3.28}$$

Произведем вычисления:

$$h = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}886}{1{,}3 \cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot 6 \cdot 10^{3}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}} = 0{,}11 \text{ м};$$

$$R = \frac{0{,}5}{1{,}3 \cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot 6 \cdot 10^{3}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}} = 10^{-2} \text{ м}.$$

Задача 3.5

Определить число оборотов, которые должна сделать α-частица, чтобы в магнитном поле циклотрона приобрести кинетическую энергию 10 МэВ, если при каждом обороте она проходит между дуантами. Разность потенциалов – 30 кВ.

Дано:

$T = 10$ МэВ;

$U = 30$ кВ;

$q_\alpha = 2|e|$;

$|e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

$N = ?$

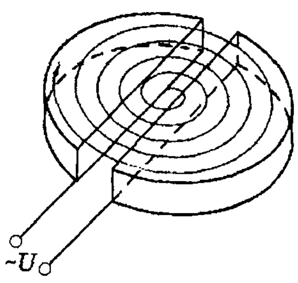

Рис. 3.5

Решение

Циклотрон состоит из двух электродов в виде половинок металлической круглой коробки, называемых дуантами, на которые подается переменное напряжение U. Дуанты помещены в однородное магнитное поле, перпендикулярное их плоскости. Заряженная частица, попавшая внутрь дуантов, будет двигаться по окружности радиусом $R = mv / q_{\alpha}B$, причем период ее обращения $T = 2\pi m / q_{\alpha}B$ не зависит от скорости частицы.

Описав полуокружность за время $t = T/2$, заряженная частица влетает в электрическое поле в тот момент, когда разность потенциалов достигает максимального значения U_{max}, ускоряется им и приобретает энергию $W = qU_{max}$. При совпадении периода обращения заряженной частицы и периода изменения разности потенциалов частица дважды в течение одного периода пролетает между дуантами. Совершив N оборотов, α-частица пролетит между дуантами $2N$ раз и, следовательно, приобретет энергию

$$T = 2NW = 2Nq_{\alpha}U_{max}.$$

Следовательно, число оборотов равно

$$N = \frac{T}{2q_{\alpha}U_{max}}.$$

Произведем вычисления:

$$N = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 30 \cdot 10^3} = 83.$$

Задача 3.6

Альфа-частица прошла ускоряющую разность потенциалов 104 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Найти отношение заряда альфа-частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, она не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

Дано:

$U = 104$ В;

$q_\alpha = 2|e|$;

$|e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

$\dfrac{q_\alpha}{m} = ?$

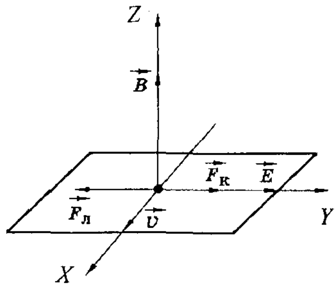

Рис. 3.6

Решение

Для того, чтобы найти отношение заряда q к массе альфа-частицы m, воспользуемся связью между работой сил электрического поля и изменением кинетической энергии частицы:

$$q_\alpha U = \frac{m\upsilon^2}{2},$$

откуда

$$\frac{q_\alpha}{m} = \frac{\upsilon^2}{2U}. \tag{3.29}$$

Скорость υ альфа-частицы найдем из следующих соображений. В рассматриваемом случае на движущуюся заряженную частицу действуют две силы:

1) сила Лоренца $F_л = q_\alpha\left[\upsilon, \vec{B}\right]$, направленная перпендикулярно скорости $\vec{v}$ и вектору магнитной индукции $\vec{B}$;

2) кулоновская сила $\vec{F}_к = q_\alpha \vec{E}$, сонаправленная с вектором напряженности $\vec{E}$ электростатического поля ($q_\alpha > 0$).

Направления всех величин показаны на рис. 3.6. Альфа-частица не будет испытывать отклонения, если геометрическая сумма $\vec{F}_л$ и $\vec{F}_к$ будет равна нулю:

$$\vec{F}_л + \vec{F}_к = 0.$$

В проекции на ось OY получим следующее выражение:

$$q_\alpha E - q_\alpha \upsilon B = 0,$$

откуда

$$\upsilon = E / B.$$

Подставив это выражение в формулу (3.29), получим

$$\frac{q_\alpha}{m} = \frac{E^2}{2UB^2}.$$

Произведем вычисления:

$$\frac{q_\alpha}{m} = \frac{(10^4)^2}{2 \cdot 104 \cdot (0{,}1)^2} = 4{,}81 \cdot 10^7 \text{ Кл/кг}.$$

З а д а ч а 3.7

По тонкому проводу в виде кольца радиусом 20 см течет ток 100 А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено однородное магнитное поле с магнитной индукцией 20 мТл. Определить работу внешних сил, которую надо совершить, чтобы повернуть кольцо на угол 90° вокруг оси, совпадающей с одним из диаметров кольца.

Дано:

$R = 20$ см;

$I = 100$ А;

$B = 20$ мТл;

$\varphi = 90^\circ$.

$A = ?$

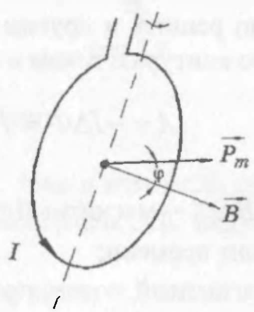

Рис. 3.7

Решение

На контур с током в виде кольца в магнитном поле с индукцией B действует момент силы

$$M = P_m B \sin\varphi, \qquad (3.30)$$

где $P_m = IS = I\pi r^2$ – магнитный момент;

φ – угол между $\overrightarrow{P_m}$ и $\vec{B}$.

В начальном положении угол $\varphi = 0$, следовательно, $M = 0$. Отличный от нуля момент силы возникает в том случае, когда внешние силы выведут контур из положения равновесия. Против этого момента и будет совершаться работа внешних сил

$$dA = Md\varphi. \qquad (3.31)$$

Работа при повороте на конечный угол φ равна

$$A = \int\limits_0^{\varphi} P_m B \sin\varphi d\varphi = P_m B(1 - \cos\varphi). \qquad (3.32)$$

В рассматриваемом случае $(\varphi = \pi/2)$ работа внешних сил определяется выражением

$$A = I\pi r^2 B. \qquad (3.33)$$

Задачу можно решить и другим способом. Работа внешних сил по перемещению контура с током в магнитном поле равна

$$A = -I\Delta\Phi = I(\Phi_1 - \Phi_2), \qquad (3.34)$$

где $\Phi_1 = BS = B\pi r^2$ – магнитный поток, пронизывающий контур в начальный момент времени;

$\Phi_2 = 0$ – магнитный поток, пронизывающий контур после поворота.

Следовательно,

$$A = I\pi r^2 B,$$

что совпадает с формулой (3.33).

Произведем вычисления:

$$A = 100 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2^2 \cdot 0{,}02 = 0{,}251 \text{ Дж}.$$

Задача 3.8

Автомобильная антенна (вертикальный проводник) длиной 2 м движется с востока на запад в магнитном поле Земли со скоростью 60 км/ч. Вычислить разность потенциалов между концами проводника. Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли принять равной $2 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Дано:

$l = 2$ м;

$\upsilon = 60$ км/ч;

$B_г = 2 \cdot 10^{-5}$ Тл;

$\alpha = 90^\circ$.

$U = ?$

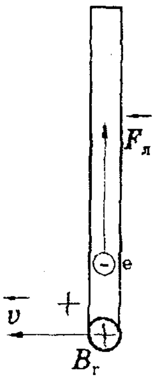

Рис. 3.8

Решение

Так как проводник разомкнут, тока в нем не будет, и разность потенциалов U на концах проводника равна ЭДС индукции:

$$U = B\, l\, \upsilon \sin\alpha,$$

где l – длина проводника;

υ – скорость его движения;

α – угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{\upsilon}$.

Смещение электронов в вертикальной антенне автомобиля под действием силы Лоренца $F_л$ происходит за счет горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли, т.е. $B = B_г$; $\sin\alpha = 1$. Так как силовые линии магнитного поля Земли направлены с юга на север, то под действием $F_л$ электроны переместятся к верхнему концу антенны. Таким образом, нижний конец антенны зарядится положительно и будет иметь более высокий потенциал, чем верхний.

Возникшая разность потенциалов равна

$$U = B_г l \upsilon .$$

Произведем вычисления:

$$U = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 1000}{3600} = 6{,}67 \cdot 10^{-6} \text{ В}.$$

Задача 3.9

В однородном магнитном поле ($B = 0{,}1$ Тл) равномерно с частотой 10 $с^{-1}$ вращается рамка, содержащая 1000 витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь рамки – 150 $см^2$. Ее вращение совершается вокруг оси, лежащей в ее плоскости и перпендикулярной линиям магнитной индукции. Найти максимальную ЭДС индукции во вращающейся рамке. Определить количество электричества, которое протечет через рамку за время ее поворота на угол 30° в случаях, если угол поворота рамки изменяется: 1) от 0 до 30°; 2) от 30 до 60°. Сопротивление рамки принять равным 10 Ом (рис. 3.9).

Дано:

$B = 0{,}1$ Тл;

$\nu = 10$ с$^{-1}$;

$N = 1000$;

$S = 150$ см^2;

$\varphi_0 = 0^\circ$;

$\varphi_1 = 30^\circ$;

$\varphi_2 = 60^\circ$.

$\varepsilon_{max} = ?$

$q = ?$

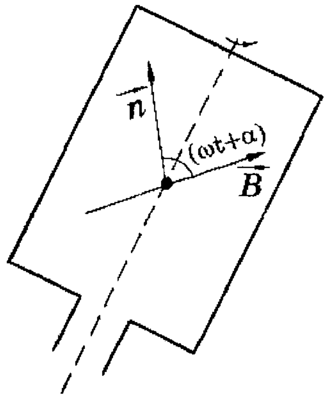

Рис. 3.9

Решение

ЭДС электромагнитной индукции определяется уравнением

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}, \tag{3.35}$$

где ψ – потокосцепление, равное в данном случае $\psi = \Phi N$.

При вращении рамки магнитный поток, пронизывающий рамку в момент времени t, определяется уравнением

$$\Phi = B\,S\cos(\omega t + \alpha), \tag{3.36}$$

где α – угол, образуемый нормалью к поверхности рамки и направлением силовых линий при $t = 0$;

$\omega = 2\pi\nu$ – циклическая (круговая) частота.

С учетом (3.36) выражение для ЭДС индукции принимает вид

$$\varepsilon_i = NBS\cdot 2\pi\nu\cdot\sin(\omega t + \alpha). \tag{3.37}$$

Из выражения (3.37) вытекает

$$\varepsilon_{i\max} = NBS \cdot 2\pi\nu . \tag{3.38}$$

Произведем вычисления:

$$\varepsilon_{i\ max} = 1000 \cdot 0,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10 = 94,2 \quad \text{В}.$$

Мгновенное значение индуктивного тока в рамке определяется законом Ома

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R},$$

где R – сопротивление.

$$I_i = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\psi}{dt} = -\frac{1}{R} N \frac{d\Phi}{dt}. \tag{3.39}$$

Мгновенное значение тока

$$I_i = \frac{dq}{dt},$$

поэтому (3.39) можно переписать в виде

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{R} N \frac{d\Phi}{dt};$$

$$dq = -N \frac{d\Phi}{R} \tag{3.40}$$

После интегрирования выражения (3.40) получим

$$\int_0^Q dq = -\frac{1}{R} N \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi;$$

$$q = N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R}. \tag{3.41}$$

Так как $\Phi = BS\cos\varphi$, окончательно имеем

$$q = \frac{NBS}{R}(\cos\varphi_0 - \cos\varphi_1). \tag{3.42}$$

В первом случае

$$q_1 = \frac{NBS}{R}(1 - \cos 30^\circ).$$

Во втором случае

$$q_2 = \frac{NBS}{R}(\cos 30^\circ - \cos 60^\circ).$$

Произведем вычисления:

$$q_1 = 1000 \cdot \frac{0{,}1 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-2}}{10} \cdot (1 - 0{,}866) = 2{,}06 \cdot 10^{-2} \quad \text{Кл};$$

$$q_2 = 1000 \cdot \frac{0{,}1 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-2}}{10} \cdot (0{,}866 - 0{,}5) = 5{,}5 \cdot 10^{-2} \quad \text{Кл}.$$

Задача 3.10

При некоторой величине тока плотность энергии магнитного поля длинного соленоида без сердечника равна 0,2 Дж/м^3. Во сколько раз увеличится плотность энергии поля при том же токе, если соленоид будет иметь сердечник? При решении задачи воспользоваться графиком рис. 3.10.

Дано:

$\omega_1 = 0{,}2$ Дж.

$\dfrac{\omega_2}{\omega_1} = ?$

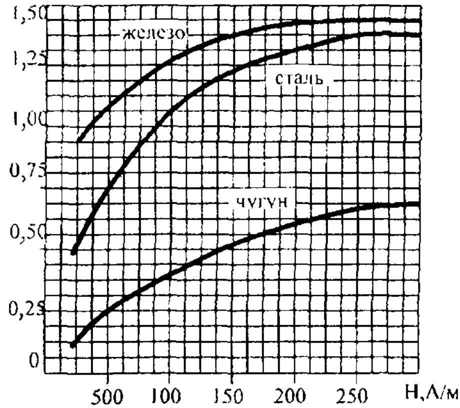

Рис. 3.10

Решение

Объемная плотность энергии магнитного поля определяется соотношением

$$\omega_1 = \frac{1}{2}\mu\mu_0 H^2, \tag{3.43}$$

где μ – магнитная проницаемость вещества;

μ_0 – магнитная постоянная;

H – напряженность магнитного поля.

Для соленоида величина H равна

$$H = nI, \tag{3.44}$$

где $n = N/l$ – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;

I – ток.

Так как ток соленоида не меняется, величина H в соответствии с (3.44) будет неизменной в обоих случаях. Следовательно, отношение ω_2/ω_1 равно

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \tag{3.45}$$

Величина μ может быть найдена по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Найдем значение H из формулы (3.43), записанной для случая, когда соленоид не содержит сердечника ($\mu_1 = 1$):

$$H = \sqrt{\frac{2\omega_1}{\mu_0}}; \qquad (3.46)$$

$$H = \frac{2 \cdot 0{,}2}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7}} = 560 \text{ А/м}.$$

В соответствии с графиком рис. 3.10, этому значению H соответствует величина $B_2 = 1{,}15$ Тл. Следовательно, величина μ_2 равна

$$\mu_2 = \frac{1{,}15}{560 \cdot 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7}} = 1{,}6 \cdot 10^3.$$

В соответствии с формулой (3.45), во столько же раз увеличивается плотность энергии в соленоиде с сердечником:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 1{,}6 \cdot 10^3.$$

Задача 3.11

Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, который состоит из воздушного плоского конденсатора с площадью каждой из пластин 100 см^2 и расстоянием между ними 3 мм и катушки длиной 10 и радиусом 0,5 см. Число витков катушки – 500. Активное сопротивление контура принять равным нулю.

Дано:

$d = 3$ мм;
$l = 10$ см;
$S = 100$ м^2;
$r = 0{,}5$ см;
$N = 500$.

$\nu = ?$

Решение

Период собственных колебаний в контуре без активного сопротивления определяется формулой Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}\,, \tag{3.47}$$

где L – индуктивность контура;

C – его электроемкость.

Индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu_0 \frac{N^2}{l} \pi r^2 \quad . \tag{3.48}$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \tag{3.49}$$

С учетом формул (3.47) и (3.48) выражение для частоты колебаний принимает вид

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{ld}{\varepsilon_0\mu_0\pi r^2 S N^2}}\,. \tag{3.50}$$

Произведем вычисления:

$$\nu = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14} \sqrt{\frac{0{,}1 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7} \cdot 3{,}14(0{,}5 \cdot 10^{-2})^2 10^{-2} \cdot 500}} =$$

$$= 1{,}867 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

Контрольная работа №3

Таблица вариантов

№	Номера задач							
0	310	320	330	340	350	360	370	380
1	301	311	321	331	341	351	361	371
2	302	312	322	332	342	352	362	372
3	303	313	323	333	343	353	363	373
4	304	314	324	334	344	354	364	374
5	305	315	325	335	345	355	365	375
6	306	316	326	336	346	356	366	376
7	307	317	327	337	347	357	367	377
8	308	318	328	338	348	358	368	378
9	309	319	329	339	349	359	369	379

301. По плоскому контуру, изображенному на рис. 3.11, течет ток силой 1,0 А. Угол между прямолинейными участками – прямой. Радиусы равны 10 см и 20 см. Найти магнитную индукцию в точке С.

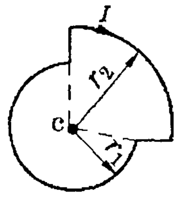

Рис. 3.11

302. Ток, равный 1 А, циркулирует в контуре, имеющем форму равнобочной трапеции (рис. 3.12). Отношение оснований трапеции – 2. Найти магнитную индукцию магнитного поля в точке А, лежащей в плоскости трапеции. Меньшее основание трапеции равно 100 мм; расстояние b = 50 мм.

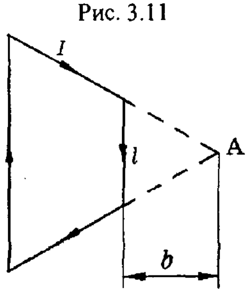

Рис. 3.12

303. Ток 5 А течет по тонкому проводнику, изогнутому, как показано на рис. 3.13. Радиус изогнутой части проводника – 120 мм; угол φ = 90°. Найти магнитную индукцию магнитного поля в точке 0.

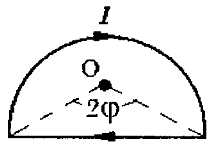

Рис. 3.13

304. Найти магнитную индукцию магнитного поля в точке О, если проводник с током 8 А имеет вид, показанный на рис. 3.14. Радиус a = 20 см; сторона b = 40 см.

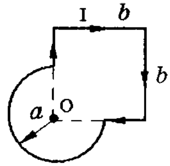

Рис. 3.14

305. Найти индукцию магнитного поля в точке О, если проводник с током 8 А имеет вид, показанный на рис. 3.15. Радиус изогнутой части проводника – 100 мм; прямолинейные участки проводника очень длинные.

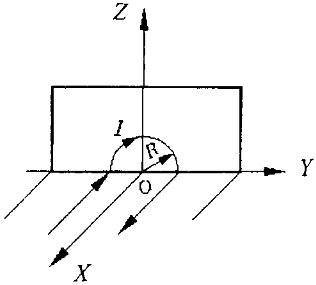

Рис. 3.15

306. Найти магнитную индукцию магнитного поля в точке О, если проводник с током 8 А имеет вид, показанный на рис. 3.16. Радиус изогнутой части проводника – 100 мм; прямолинейные участки проводника очень длинные.

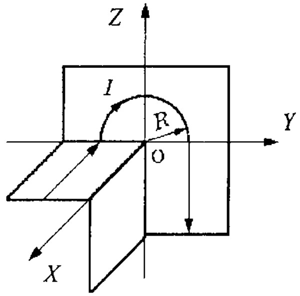

Рис. 3.16

307. Найти величину тока в бесконечно длинном проводнике, который имеет квадратный изгиб со стороной квадрата 40 см (рис. 3.17), если модуль магнитной индукции магнитного поля в точке А, расположенной в центре квадрата, равен 63 мкТл.

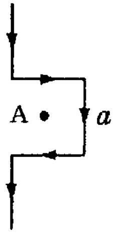

Рис. 3.17

308. Прямой бесконечный проводник имеет круговую петлю радиусом 80 см (рис. 3.18). Определить ток в проводнике, если известно, что в точке А магнитная индукция магнитного поля равна 12,5 мкТл.

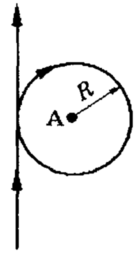

Рис. 3.18

309. По бесконечно длинному прямому проводнику, изогнутому так, как показано на рис. 3.19, течет ток 100 А. Определить магнитную индукцию магнитного поля в точке О, если радиус изогнутой части проводника равен 10 см.

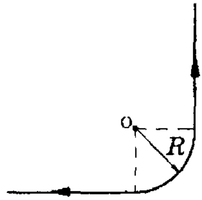

Рис. 3.19

310. Определить магнитную индукцию магнитного поля в точке О, если проводник с током 50 А имеет вид, показанный на рис. 3.20. Радиус изогнутой части проводника равен 60 см; прямолинейные участки проводника очень длинные.

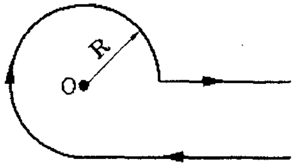

Рис. 3.20

311. В магнитном поле бесконечно длинного проводника, в котором течет ток 20 А, находится квадратная рамка со стороной 20 см, в которой течет ток 1 А. Проводник и рамка расположены в одной плоскости так, что две стороны рамки перпендикулярны проводнику. Расстояние от проводника до ближайшей стороны рамки b = 5 см. Определить величину силы, действующей на рамку.

312. На двух параллельных шинах, расположенных горизонтально на расстоянии 10 см, лежит толстый проводник массой 100 г. Шины подключены к источнику напряжения, и в проводнике возникает ток 10 А. При создании магнитного поля, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости шин, проводник приходит в равномерное движение. Определить магнитную индукцию магнитного поля, если коэффициент трения проводника о шины равен 0,2.

313. Какой вращающий момент испытывает рамка с током 10 А при помещении ее в однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,5 Тл, если рамка содержит 50 витков площадью 20 $см^2$, а ее нормаль образует с вектором индукции магнитного поля угол 30°?

314. Квадратная рамка с током 0,9 А расположена в одной плоскости с длинным прямым проводником, по которому течет ток 5 А. Сторона рамки – 8 см. Проходящая через середины противоположных сторон ось рамки параллельна проводу и отстоит от него на расстояние, которое в 1,5 раза больше стороны рамки. Найти механическую работу, которую нужно совершить для поворота рамки вокруг оси на 180°, если токи поддерживать неизменными.

315. Определить магнитный момент кругового витка, если известно, что на его оси на расстоянии 4 см от центра магнитная индукция магнитного поля 125 мкТл. Радиус витка – 3 см.

316. Соленоид длиной 10 см и диаметром 4 см содержит 20 витков на каждом сантиметре длины. Определить магнитный момент соленоида, если ток в нем равен 2 А.

317. В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл находится прямой медный проводник сечением 8 $мм^2$, концы которого подключены гибким проводником, находящимся вне поля, к источнику постоянного тока. Определить ток в проводнике, если известно, что его вес уравновешивается силой со стороны магнитного поля.

318. Тонкое кольцо радиусом 20 см несет равномерно распределенный по поверхности заряд 0,1 мкКл. Кольцо вращается относительно своей оси, совпадающей с одним из диаметров кольца, с частотой 20 $с^{-1}$. Определить магнитный момент кольца.

319. По тонкому стержню длиной 40 см равномерно распределен заряд 500 нКл. Стержень приведен во вращение с постоянной угловой скоростью 20 рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через один из его концов. Определить магнитный момент, обусловленный вращением заряженного кольца.

320. По тонкому горизонтально расположенному проводу проходит ток 5 А. Под ним находится второй, параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток 1 А. Расстояние между проводами – 1 см. Какой должна быть площадь поперечного сечения второго провода, чтобы он находился в состоянии равновесия незакрепленным? Какое это будет равновесие?

321. Прямой проводник длиной 1 м перемещается в магнитном поле, при этом проводник, магнитное поле и направление перемещения проводника перпендикулярны между собой. Определить силу Лоренца, с которой магнитное поле действует на свободный электрон, находящийся в проводнике, если возникающая на его концах разность потенциалов – $3 \cdot 10^{-5}$ В.

322. Электрон влетает в однородное магнитное поле, магнитная индукция которого – 10^{-3} Тл, со скоростью 6000 км/с. Направление скорости составляет угол 30^0 с направлением магнитного поля. Определить траекторию движения электрона в магнитном поле.

323. Заряженная частица влетела перпендикулярно линиям магнитной индукции в однородное магнитное поле, созданное в среде. В результате взаимодействия с веществом частица, находясь в магнитном поле, потеряла половину своей первоначальной энергии. Во сколько раз будут отличаться радиусы кривизны траектории начала и конца пути?

324. В циклотроне требуется ускорять ионы гелия. Частота переменной разности потенциалов, приложенной к дуантам, равна 10 МГц. Какой должна быть магнитная индукция магнитного поля, чтобы период T вращения ионов совпадал с периодом изменения разности потенциалов?

325. Определить энергию, которую приобретает протон, сделав 40 оборотов в магнитном поле циклотрона, если максимальное значение переменной разности потенциалов между дуантами равно 60 кВ. Определить также относительное увеличение массы протона в сравнении с массой покоя, а также скорость протона.

326. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 500 В, попал в вакууме в однородное магнитное поле и движется по окружности радиусом 10 см. Определить модуль магнитной индукции магнитного поля, если скорость электрона перпендикулярна линиям магнитной индукции.

327. Электрон, движущийся в вакууме со скоростью 10^6 м/с, попадает в однородное магнитное поле с магнитной индукцией 1,2 мТл под углом 30^0 к магнитным силовым линиям. Определить радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

328. Определить число оборотов, которые должен сделать протон в магнитном поле циклотрона, чтобы приобрести кинетическую энергию 10 МэВ, если при каждом обороте протон проходит между дуантами разность потенциалов 30 кВ.

329. Два иона, имеющие одинаковый заряд, но различные массы, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион начал двигаться по окружности радиусом 5 см, второй – по окружности радиусом 2,5 см. Найти отношение масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

330. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией 100 мкТл движется электрон по винтовой линии. Определить скорость электрона, если шаг винтовой линии равен 20 см, радиус – 5 см.

331. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов 104 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля – 10 кВ/м. Магнитная индукция – 0,1 Тл. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

332. Плоский конденсатор, между пластинами которого создано электрическое поле, напряженность которого – 100 В/м, помещен в магнитное поле так, что силовые линии полей взаимно перпендикулярны. Какой должна быть магнитная индукция магнитного поля, чтобы электрон с начальной кинетической энергией 4 МэВ, влетевший в пространство между пластинами конденсатора перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, не изменил направления скорости?

333. Положительно заряженная частица влетает в одинаково направленные перпендикулярно ее скорости однородное магнитное и электрическое поля. Определить, под каким углом к полям будет направлено ее ускорение в этот момент, если скорость частицы – 10^3 м/с, магнитная индукция магнитного поля – $57 \cdot 10^{-2}$ Тл, напряженность электрического поля – 35 В/м.

334. Найти скорость α-частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, не испытывает никакого отклонения. Магнитная индукция магнитного поля – 0,6 мТл, напряженность электрического поля – 6 кВ/м. Направление скорости α-частицы перпендикулярно векторам B и E.

335. Полагая, что в алюминии число свободных электронов, приходящихся на каждый атом, равно 2, определить холловскую разность потенциалов, которая возникает вдоль ширины ленты при помещении ее в однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,6 Тл. Ширина ленты – 10 см, плотность тока в ленте – 5 МА/м^2. Вектор магнитной индукции магнитного поля перпендикулярен скорости ленты.

336. Тонкая медная лента толщиной 0,1 мм помещена в однородное магнитное поле с индукцией 0,9 Тл так, что плоскость ленты перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. В ленте течет ток 10 А. Определить холловскую разность потенциалов, возникающую вдоль ширины ленты, считая, что в меди имеется по одному свободному электрону на каждый атом.

337. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,8 Тл помещена тонкая медная пластина, в которой течет ток 5 А. Вектор магнитной индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости пластины. Толщина пластины – 0,01 мм. Определить концентрацию свободных электронов в меди, если возникающая вдоль ширины ленты холловская разность потенциалов 2 мкВ.

338. При эффекте Холла в натриевом проводнике напряженность поперечного электрического поля оказалась 5 мкВ/см при плотности тока 200 А/см^2 и магнитной индукции поля 1 Тл. Найти концентрацию электронов проводимости и ее отношение к концентрации атомов в данном проводнике.

339. Найти подвижность электронов проводимости в медном проводнике, если в магнитном поле, магнитная индукция которого – 100 мТл, напряженность поперечного поля, обусловленного эффектом Холла, у данного проводника оказалась в $3{,}1\cdot10^3$ раз меньше напряженности продольного электрического поля.

340. Покоящийся в начальный момент электрон ускоряется электрическим полем, напряженность которого постоянна. Через 0,01 с он влетает в магнитное поле, магнитная индукция которого – 10^{-5} Тл, перпендикулярное электрическому. Во сколько раз нормальное ускорение электрона в этот момент больше его тангенциального ускорения?

341. Соленоид длиной 1 м и сечением 16 см^2 содержит 2000 витков. Вычислить потокосцепление при токе в обмотке 10 А.

342. В одной плоскости с длинным проводом, по которому течет ток 50 А, расположена прямоугольная рамка так, что две большие стороны ее длиной 65 см параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из сторон равно ее ширине. Найти магнитный поток, пронизывающий рамку.

343. Виток, по которому течет ток силой 20 А, свободно установился в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,016 Тл. Диаметр витка равен 10 см. Определить работу, которую надо совершить, чтобы повернуть виток на угол $\pi/2$ относительно оси, совпадающей с диаметром. Определить эту работу, если угол равен 2π.

344. По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной 10 см, течет ток 20 А, величина которого поддерживается неизменной. Плоскость квадрата составляет угол 20° с магнитными силовыми линиями. Магнитная индукция однородного магнитного поля равна 0,1 Тл. Вычислить работу, которую необходимо совершить для того, чтобы удалить провод за пределы магнитного поля.

345. Квадратная рамка со стороной 10 см, сделанная из проводника, площадь поперечного сечения которого – 1 мм^2 и удельное сопротивление – $2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, присоединена к источнику постоянного напряжения 4 В и помещена в однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,1 Тл. Определить максимальный момент сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля.

346. Квадратный контур со стороной 10 см, в котором течет ток 6 А, находится в магнитном поле с магнитной индукцией 0,8 Тл под углом 50° к магнитным силовым линиям. Какую работу нужно совершить, чтобы при неизменном токе в контуре изменить его форму на окружность?

347. Круговой контур помещен в однородное магнитное поле так, что плоскость контура перпендикулярна магнитным силовым линиям. Напряженность магнитного поля – $1,6 \cdot 10^5$ А/м. По контуру течет ток 2 А. Радиус контура – 2 см. Какую работу надо совершить, чтобы повернуть контур на 90° вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

348. Плоский контур, площадь которого – 300 см^2, находится в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,01 Тл. Плоскость контура перпендикулярна магнитным силовым линиям. В контуре поддерживается неизменный ток 10 А. Определить работу внешних сил по перемещению контура с током в область пространства, в которой магнитное поле отсутствует.

349. По кольцу, сделанному из тонкого гибкого провода радиусом 10 см, течет ток силой 100 А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено магнитное поле с магнитной индукцией 0,1 Тл, по направлению совпадающей с индукцией собственного магнитного поля кольца. Определить работу внешних сил, которые, действуя на провод, деформировали его и придали ему форму квадрата. Ток при этом поддерживается постоянный. Работой против упругих сил пренебречь.

350. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции расположен плоский контур площадью 100 см^2. Поддерживая в контуре постоянный ток 50 А, его переместили из поля в область пространства, где поле отсутствует. Определить магнитную индукцию магнитного поля, если при перемещении контура была совершена работа 0,4 Дж.

351. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,4 Тл в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного поля, вращается стержень длиной 10 см. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить разность потенциалов на концах стержня при частоте вращения 16 с$^{-1}$.

352. Рамка площадью 200 см^2 равномерно вращается с частотой 10 с$^{-1}$ относительно оси, лежащей в плоскости рамки, перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля с магнитной индукцией 0,2 Тл. Каково среднее значение ЭДС индукции за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения?

353. Определить разность потенциалов на концах оси железнодорожного вагона, имеющего длину 1,6 м, если на горизонтальном участке пути скорость поезда – 45 км/ч, а вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли – $2 \cdot 10^{-5}$ Тл.

354. С какой угловой скоростью надо вращать прямой проводник вокруг одного из его концов в однородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной к силовым линиям поля, чтобы в проводнике возникла ЭДС 0,3 В? Длина проводника – 20 см. Магнитная индукция поля – 0,2 Тл.

355. Рамка площадью 1 дм^2 из проволоки сопротивлением 0,45 Ом вращается с угловой скоростью 100 рад/с в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,1 Тл. Ось вращения рамки лежит в ее плоскости и перпендикулярна вектору магнитной индукции. Определить количество теплоты, которое выделяется в рамке за 10^3 оборотов. Самоиндукцией пренебречь.

356. Плоский виток изолированного провода перегибают, придавая ему вид восьмерки, а затем помещают в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Длина витка – 120 см. Петли восьмерки можно считать окружностями с отношением радиусов 1:2. Какой ток пройдет по проводу, если поле будет убывать с постоянной скоростью 10 Тл/с? Сопротивление витка – 1 Ом.

357. Магнитный поток через катушку, состоящую из 75 витков, равен 4,8 10 Вб. За сколько времени должен исчезнуть этот поток, чтобы в катушке возникла средняя ЭДС индукции 0,75 В?

358. Рамка, содержащая 10 витков площадью 5 см, присоединена к баллистическому гальванометру с внутренним сопротивлением 58 Ом и помещена между полюсами электромагнита так, что линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости рамки. Определить магнитную индукцию поля, создаваемого электромагнитом, если при повороте рамки на 180° в цепи гальванометра протекает заряд 30 мкКл. Сопротивление рамки – 2 Ом.

359. Проволочный виток радиусом 4 см, имеющий сопротивление 0,01 Ом, находится в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,04 Тл. Плоскость рамки составляет угол 30 ° с линиями индукции магнитного поля. Какое количество электричества протечет по витку, если магнитное поле исчезнет?

360. В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. По цепи протекло количество электричества 10 мкКл. Определить магнитный поток, пересеченный кольцом, если сопротивление цепи гальванометра равно 30 Ом.

361. В длинной катушке радиусом 2 см, содержащей 500 витков, величина тока равна 5 А. Определить индуктивность катушки, если магнитная индукция магнитного поля внутри катушки – 12,5 мТл.

362. На длинный стальной сердечник сечением 4 см^2 намотан соленоид, содержащий 1000 витков, по которому проходит ток 0,5 А. Определить индуктивность соленоида при этих условиях, если напряженность магнитного поля внутри соленоида – 2 кА/м. Воспользоваться графиком $B = f(H)$ (рис. 3.10).

363. Найти индуктивность соленоида, полученного при намотке провода длиной l_2 = 10 м на цилиндрический железный стержень длиной l_2 = 10 см. Магнитная проницаемость железа μ = 400.

364. На железный сердечник сечением 5 см^2 и длиной 30 см намотан соленоид, содержащий 500 витков проволоки сечением 1 мм^2. Чему равна индуктивность соленоида при подключении его к аккумулятору с ЭДС 1,26 В? Внутренним сопротивлением аккумулятора и сопротивлением подводящих проводников пренебречь. Воспользоваться графиком $B = f(H)$ (рис. 3.10).

365. Диаметр немагнитного каркаса соленоида – 0,1 м. Соленоид содержит 5000 витков. При подключении соленоида к аккумулятору с ЭДС 12 В через $1{,}0\cdot10^{-3}$ с сила тока в цепи достигает значения 2 А. Определить длину соленоида, если его сопротивление – 3 Ом. Сопротивлением аккумулятора и подводящих проводников можно пренебречь.

366. Определить энергию магнитного поля соленоида, содержащего 5000 витков, которые намотаны на картонный каркас радиусом 2 см и длиной 0,5 м, если сила тока в нем – 5 А.

367. Радиус длинного парамагнитного сердечника соленоида – 1 см. Соленоид содержит 10 витков на 1 см длины. Обмотка выполнена из медного провода сечением 1 см^2. Через какое время в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике, если она подключена к источнику постоянного напряжения?

368. Тороид с сердечником из чистого железа имеет обмотку, содержащую 500 витков, в которой протекает ток 2 А. Сечение тороида – 10 см^2, средний радиус – 30 см. Определить магнитную энергию, запасенную в сердечнике. Воспользоваться графиком $B = f(H)$ (рис. 3.10).

369. По соленоиду течет ток 5 А. Длина соленоида – 1 м, число витков – 500, площадь поперечного сечения – 50 см. В соленоид вставлен железный сердечник (график зависимости $B = f(H)$ (рис. 3.10)). Найти энергию магнитного поля соленоида.

370. Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет 251 виток. Средний диаметр тороида равен 8 см, диаметр витков – 2 см. На тороид намотана вторичная обмотка, имеющая 100 витков. При замыкании первичной обмотки в ней в течение 1 мс устанавливается ток 3 А. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающей во вторичной обмотке.

371. Колебательный контур имеет индуктивность 1,6 Гн, емкость 0,04 мкФ и максимальное напряжение на зажимах 200 В. Чему равна максимальная сила тока в контуре? Сопротивление в контуре ничтожно мало.

372. Катушка (без сердечника) длиной 50 см и сечением 3 см^2 имеет 1000 витков и соединена параллельно с конденсатором. Конденсатор состоит из двух пластин площадью 75 см^2 каждая. Расстояние между пластинами – 5 мм, диэлектрик – воздух. Определить период колебаний контура.

373. Три одинаково заряженных конденсатора емкостью 5 мкФ каждый соединяют в батарею и подключают к катушке, активное сопротивление которой – 20 Ом, индуктивность – 0,02 Гн. Во сколько раз будут отличаться периоды затухающих колебаний, если конденсаторы один раз соединены параллельно, а второй – последовательно?

374. Уравнение изменения величины тока в колебательном контуре со временем дается в виде $i = -0{,}02 \cdot \sin 400\pi t$ А. Индуктивность контура – 1 Гн. Найти: 1) период колебаний; 2) емкость контура; 3) максимальную разность потенциалов на обкладках конденсатора; 4) максимальную энергию электрического поля.

375. Заряженный конденсатор емкостью 0,5 мкФ подключили к катушке индуктивностью 5 мГн. Через какое время от момента подключения катушки энергия электрического поля конденсатора станет равной энергии магнитного поля катушки? Активным сопротивлением катушки пренебречь.

376. Какое сопротивление может содержать колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью 10 мГн и конденсатора емкостью 4 мкФ, чтобы в нем могли еще возникнуть электромагнитные колебания?

377. Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, который состоит из конденсатора емкостью 2 мкФ и катушки длиной 0,1 и радиусом 1 см, содержащей 500 витков, если относительная магнитная проницаемость среды, заполняющей катушку, равна 1. Сопротивлением катушки можно пренебречь.

378. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2 мкФ и катушки индуктивностью 0,1 Гн и сопротивлением 10 Ом. Определить логарифмический декремент затухания колебаний.

379. Определить активное сопротивление колебательного контура, индуктивность которого – 1 Гн, если через 0,1 с амплитудное значение разности потенциалов на обкладках конденсатора уменьшилось в 4 раза.

380. Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, содержащего конденсатор емкостью 0,5 мкФ, если максимальная разность потенциалов на его обкладках достигает 100 В, а максимальный ток в катушке равен 50 мА. Активным сопротивлением катушки пренебречь.

4. ОПТИКА. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Основные формулы

Оптика

Фазовая скорость света в среде

$$\upsilon = \frac{c}{n},$$

где c – скорость света в вакууме;

n – абсолютный показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны

$$L = nl,$$

где l – геометрическая длина пути световой волны в среде с абсолютным показателем преломления n.

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

Зависимость разности фаз от оптической разности хода световых волн

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{\Delta}{\lambda_0}\right),$$

где λ_0 – длина волны света в вакууме.

Условие максимального усиления света при интерференции (max интерференции)

$$\Delta = \pm k\lambda_0;\ k = 0,\ 1,\ 2...$$

Условие максимального ослабления света (min интерференции)

$$\Delta = \pm(2k+1)\frac{\lambda_0}{2}.$$

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от тонкой пленки, расположенной в вакууме:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

или

$$\Delta = 2dn\cos i_2 \pm \frac{\lambda_0}{2},$$

где d – толщина пленки;

n – показатель преломления пленки;

i_1 – угол падения;

i_2 – угол преломления света в пленке.

Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете

$$r_k = \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2}};\ k = 1,\ 2,\ 3...;\ \lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

где k – номер кольца;

R – радиус кривизны линзы;

λ – длина волны света в среде клина с абсолютным показателем преломления n.

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} = \sqrt{kR\frac{\lambda_0}{n}}.$$

Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции на одной щели, определяется из условия

$$a \sin\varphi = \frac{(2k+1)\cdot\lambda_0}{2}; \; k = 0, 1, 2, 3\ldots,$$

где a – ширина щели;

k – порядковый номер максимума.

Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции на дифракционной решетке:

$$d \sin\varphi = \pm \mathrm{k}\lambda_0; \; k = 0, 1, 2, 3\ldots,$$

где d – период дифракционной решетки.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} = kN,$$

где $\Delta\lambda$ — наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ_0 и $\lambda_0 + \Delta\lambda_0$), при которой эти линии могут быть видны раздельно в спектре, полученном посредством данной решетки;

N – полное число щелей решетки.

Формула Вульфа – Брэггов

$$2\,d \sin\theta = k\,\lambda,$$

где θ – угол скольжения (угол между направлением параллельного рентгеновского излучения, падающего на кристалл, и атомной плоскостью в кристалле);

d – расстояние между атомными плоскостями кристалла.

Закон Брюстера

$$\mathrm{tg}\, i_{\text{B}} = n_{21},$$

где i_B – угол падения, при котором отразившийся от диэлектрика свет полностью поляризован;

n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Закон Малюса

$$J = J_0 \cos^2\alpha,$$

где J_0 – интенсивность плоско поляризованного света, падающего на анализатор;

J – интенсивность этого света после анализатора;

α – угол между направлением колебаний светового вектора волны, падающей на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора (если колебания светового вектора падающей волны совпадают с этой плоскостью, анализатор пропускает данный свет без ослабления).

Угол поворота плоскости поляризации монохроматического света при прохождении через оптически активное вещество:

1) $\varphi = d\alpha$ (в твердых телах),

где α – постоянная вращения;

d – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;

2) $\varphi = [\alpha]\rho d$ (в чистых жидкостях),

где $[\alpha]$ – удельное вращение;

ρ – плотность жидкости;

3) $\varphi = [\alpha]Cd$ (в растворах),

где C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

где m_0 – масса покоя частицы;

υ – ее скорость;

c – скорость света в вакууме;

β – скорость частицы, выраженная в долях скорости света, $\beta = \upsilon / c$.

Взаимосвязь массы и энергии релятивистской частицы

$$E = mc^2 \quad \text{или} \quad \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

где $E_0 = m_0 c^2$ – энергия покоя частицы.

Полная энергия свободной частицы

$$E = E_0 + T,$$

где T – кинетическая энергия релятивистской частицы.

Импульс релятивистской частицы

$$p = m_0 c \cdot \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы

$$E^2 = E_0^2 + (pc)^2.$$

Закон Стефана-Больцмана

$$R_0 = \sigma T^4,$$

где R_0 – энергетическая светимость (излучательность) абсолютно черного тела;

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

T – термодинамическая температура, К.

Закон смещения Вина

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где λ_m – длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения;

b – постоянная Вина.

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega,$$

где $\hbar$ – постоянная Планка, $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$;

ν – частота фотона;

ω – циклическая частота.

Масса фотона

$$m = \frac{h}{c\lambda},$$

где c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны света в вакууме.

Импульс фотона

$$p = mc = \frac{h}{\lambda}.$$

Формула Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + T_{\max} = A + mv_{\max}^2/2,$$

где $h\nu$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла;

A – работа выхода электрона;

$T_{\max}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}; \; \lambda_{\max} = \frac{\hbar c}{A},$$

где $\nu_{\min}$ – минимальная частота света, при которой еще возможен фотоэффект;

λ_{max} – максимальная длина волны света, при которой еще возможен фотоэффект;

$\hbar$ – постоянная Планка;

c – скорость света в вакууме.

Формула Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = 2\frac{h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2},$$

где λ – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабосвязанным электроном;

λ' – длина волны фотона, рассеянного на угол θ после столкновения с электроном;

m_0 – масса покоящегося электрона.

Комптоновская длина волны

$$\lambda_k = h/(m_0 c).$$

Давление света при нормальном падении на поверхность

$$P = \frac{E_e}{c}(1+\rho) = \omega\cdot(1+\rho),$$

где E_e – энергетическая освещенность (облученность);

ω – объемная плотность энергии излучения;

ρ – коэффициент отражения.

Волновые свойства частиц

Длина волны де Бройля:

$$\lambda_Б = \frac{2\pi h}{p},$$

где p – импульс частицы.

Импульс частицы и его связь с кинетической энергией T

$$p = m_0\upsilon;$$

$$p = \sqrt{2m_0T};\ T << E_0;$$

$$p = m\upsilon\frac{m_0\upsilon}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}};$$

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{(2E_0+T)T};\ T \geq E_0,$$

где m_0 – масса покоя частицы;

m – релятивистская масса;

υ– скорость частицы;

c – скорость света в вакууме;

E_0 – энергия покоя частицы, $E_0 = m_0c^2$.

Соотношение неопределенностей:

для координаты и импульса

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar,$$

где Δp_x – неопределенность проекции импульса на ось x;

Δx – неопределенность координаты;

$\hbar = h/2\pi$;

для энергии и времени

$$\Delta E \Delta t \geq n,$$

где ΔE – неопределенность энергии;

Δt – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

Боровская теория водородоподобного атома

Момент импульса электрона (второй постулат Бора)

$$L_n = \hbar \cdot n \quad \text{или} \quad m\upsilon_n r_n = \hbar \cdot n,$$

где m – масса электрона;

υ_n – скорость электрона на n-й орбите;

r_n – радиус n-й стационарной орбиты;

$\hbar$ – постоянная Планка;

n – главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \ldots$).

Радиус n-й стационарной орбиты

$$r_n = a_0 n^2,$$

где a_0 – первый боровский радиус.

Энергия электрона в атоме водорода

$$E_n = E_i / n^2,$$

где E_i – энергия ионизации атома водорода.

Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода:

$$\varepsilon = \hbar\omega = E_{n_2} - E_{n_1},$$

где n_1 и n_2 – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона в атоме.

Спектроскопическое волновое число

$$\bar{\nu} = 1/\lambda = R \cdot (1/n_1^2 - 1/n_2^2),$$

где λ – длина волны излучения или поглощения атомом;

R – постоянная Ридберга.

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}+\frac{2m}{\hbar^2}(E-\Pi)\psi(x)=0,$$

где Ψ – волновая функция, описывающая состояние частицы;

E – полная энергия;

$\Pi=\Pi(x)$ – потенциальная энергия частицы.

Плотность вероятности

$$\frac{d\omega(x)}{dx}=|\psi(x)|^2,$$

где $d\omega(x)$ – вероятность того, что частица может быть обнаружена вблизи точки с координатой x на участке dx.

Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2

$$\omega=\int_{x_1}^{x_2}|\psi(x)|^2\,dx.$$

Решение уравнения Шредингера для одномерного бесконечно глубокого прямоугольного потенциального ящика:

собственная нормированная волновая функция

$$\psi_n(x)=\sqrt{\frac{2}{l}}\sin\frac{\pi n}{l}x;$$

собственное значение энергии

$$E_n=\frac{\pi^2\hbar^2n^2}{2ml^2},$$

где n – квантовое число, $n=1, 2, 3,\ldots$;

l – ширина ящика.

В области $x \le 0$ *и* $x \ge l$ $\psi(x) = 0, \Pi \to \infty$.

Атомное ядро. Радиоактивность

Массовое число ядра (число нуклонов в ядре)

$$M = Z + N,$$

где Z – зарядовое число (число протонов);

N – число нейтронов.

Закон радиоактивного распада

$$dN = -\lambda N dt \quad \text{или} \quad N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где dN – число ядер, не распадающихся за интервал времени dt;

N – число ядер, не распавшихся к моменту времени t;

N_0 – число ядер в начальный момент ($t = 0$);

λ – постоянная радиоактивного распада.

Число ядер, распавшихся за время t:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

В случае, если интервал времени, за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, число распавшихся ядер можно определить по формуле

$$\Delta N = \lambda N \Delta t.$$

Зависимость периода полураспада от постоянной радиоактивного распада

$$T_{1/2} = (\ln 2) / \lambda = 0{,}693 / \lambda.$$

Среднее время жизни τ радиоактивного ядра, т. е. интервал времени, за который число распавшихся ядер уменьшается в e раз:

$$\tau = 1 / \lambda.$$

Число N атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

$$N = mN_A / \mu,$$

где m – масса изотопа;

μ – молярная масса;

N_A – постоянная Авогадро.

Активность A радиоактивного изотопа

$$A = -dN/dt = \lambda N \quad \text{или} \quad A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где dN – число ядер, распадающихся за интервал времени dt;

A_0 – активность изотопа в начальный момент времени.

Удельная активность изотопа

$$\alpha = A/m.$$

Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + (M - Z) \cdot m_n - m,$$

где Z – зарядовое число (число протонов в ядре);

M – массовое число;

$(A - Z)$ – число нейтронов в ядре;

m_P – масса протона;

m_n – масса нейтрона;

m – масса ядра.

Энергия связи ядра

$$E_{св} = \Delta mc^2,$$

где Δm – дефект массы ядра;

c – скорость света в вакууме.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра равна

$$E_{св} = 931\ \Delta m,$$

где дефект массы Δm – в а. е. м.;

931 – коэффициент пропорциональности (1 а. е. м. ≈ 931 МэВ).

Теплоемкость кристалла

Средняя энергия квантового осциллятора

$$< E >= \varepsilon_0 + \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1},$$

где ε_0 – нулевая энергия, $\varepsilon_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$;

ω – круговая частота колебаний осциллятора;

k – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура.

Молярная внутренняя энергия системы, состоящей из невзаимодействующих квантовых осцилляторов:

$$U_m = U_{om} + \frac{3R\theta_E}{e^{\theta_E/T} - 1},$$

где R – молярная газовая постоянная;

$\theta_E = \hbar\,\omega/k$ – характеристическая температура Эйнштейна;

$U_{om} = \frac{3}{2}R\theta_E$ – молярная нулевая энергия (по Эйнштейну).

Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела в области низких температур (предельный закон Дебая)

$$C_m = \frac{12\pi^4}{5}R\left(\frac{T}{\theta_Д}\right)^3 = 234R\left(\frac{T}{\theta_Д}\right)^3 \left(T << \theta_Д\right).$$

Теплота, необходимая для нагревания тела:

$$Q = \frac{m}{\mu} \int_{T_1}^{T_2} C_m dT,$$

где m – масса тела;

μ – молярная масса;

T_1, T_2 – начальная и конечная температура тела.

Элементы квантовой статистики

Распределение свободных электронов в металле по энергиям при 0 К

$$dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \varepsilon^{1/2} d\varepsilon,$$

где $dn(\varepsilon)$ – концентрация электронов, энергия которых заключена в пределах от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$;

m – масса электрона.

Это выражение справедливо при $\varepsilon < \varepsilon_F$, где ε_F – энергия или уровень Ферми.

Энергия Ферми в металле при $T = 0$ К

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}.$$

Дозы радиационного облучения

Поглощенная доза $Д$ – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облученным телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы:

$$Д = \frac{dW}{dm}.$$

Единица поглощенной дозы в системе СИ – грэй (Гр), 1 Гр = = 1 Дж/кг. Внесистемная единица – радиан (рад), 1 рад = 0,01 Гр.

Эквивалентная доза H – поглощенная доза, умноженная на коэффициент качества K, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма, $H = K \cdot Д$. Единица эквивалентной дозы в СИ – зиверт (Зв), 1 Зв = 1 Дж/кг. Внесистемная единица – бэр, 1 бэр = 0,01 Зв.

Коэффициенты качества приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Вид излучения	Средняя удельная ионизация, пар ионов/мкм	Коэффициент качества К
γ-, β- излучение,	≤ 100	1
тяжелые частицы	< 100	1
	100…200	1…2
	200…650	2…5
	650…1500	5…10
	1500…5000	10…20

Эффективная эквивалентная доза $H_{эф}$ – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению, который также измеряется в зивертах:

$$H_{эф} = \sum_T \omega_T H_T ,$$

где ω_T – коэффициент радиационного риска, $\sum_T \omega_T = 1$.

В табл. 4.2 приведены коэффициенты радиационного риска.

Таблица 4.2

ω_T	Ткань организма
0,12	красный костный мозг
0,03	костная ткань
0,03	щитовидная железа
0,15	молочные железы
0,12	легкие
0,25	яичники или семенники
0,30	другие части тела
1,00	организм в целом

Коллективная эффективная эквивалентная доза $H_{\text{кол}}$ – эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации. Измеряется в человеко-зивертах (чел.-Зв).

Полная коллективная эффективная эквивалентная доза $H_{\text{кол полн}}$ – коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают поколения людей от какого-либо источника за все время его дальнейшего существования.

Экспозиционная доза численно равна абсолютному значению полного заряда ионов одного знака, которые образуются в воздухе при полном торможении электронов и позитронов, освобожденных фотонами в единице массы воздуха:

$$X = \frac{dq}{dm}.$$

Единица экспозиционной дозы в системе СИ – 1 Кл/кг.

Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р):

$$1\ \text{Р} = 2{,}58 \cdot 10^{-4}\ \text{Кл/кг};$$

$$1\ \text{Кл/кг} = 3{,}88 \cdot 10^{3}\ \text{Р}.$$

Для воды и биологической ткани 1 Р = 1 рад.

Предельно допустимые мощности дозы, соответствующие 100 мБэр в неделю, приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Излучение	Энергия излучения	Мощность дозы при 36-часовой раб. неделе	К
рентгеновские и γ-лучи	до 3 МэВ	2,8 мР/ч	1
β-частицы и электроны	до 10 МэВ	20 частиц / (см^2·с)	1
тепловые нейтроны	0,025 МэВ	75 нейтрон / (см^2·с)	3
быстрые нейтроны	1-10 МэВ	20 нейтрон / (см^2·с)	10

Закон ослабления узкого пучка монохроматических рентгеновских или γ-лучей слоем вещества толщиной l

$$J = J_0 e^{-\mu l},$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, $\mu = \tau + \sigma$;

τ и σ – линейные коэффициенты поглощения и рассеяния.

График зависимости коэффициента μ от энергии фотонов приведен на рис. 4.1.

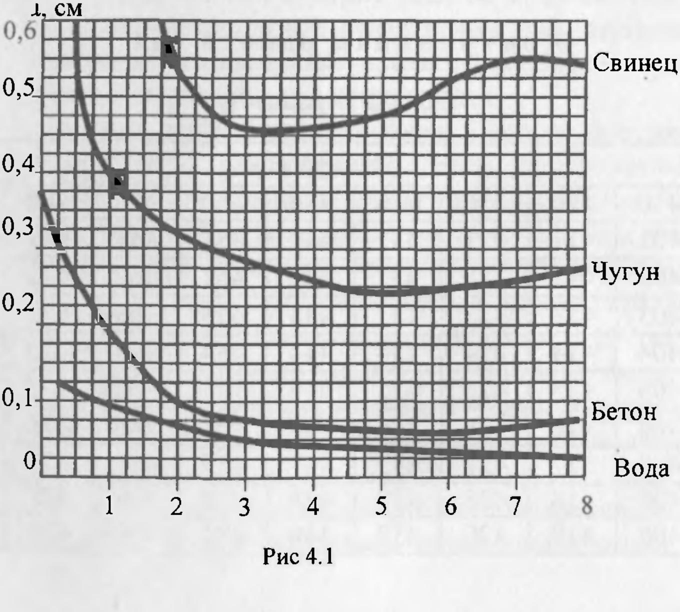

Рис 4.1

Полупроводники

Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = en(b_n + b_p),$$

где e – элементарный заряд;

n – концентрация носителей заряда (электронов и дырок);

b_n, b_p – подвижности электронов и дырок.

Напряжение на гранях прямоугольного образца при эффекте Холла (холловская разность потенциалов)

$$U_H = R_H Bja,$$

где R_H – постоянная Холла;

B – магнитная индукция;

j – плотность тока;

a – ширина пластины (образца).

Постоянная Холла для полупроводников типа алмаза, германия, кремния и др., обладающих носителями одного вида (n или p):

$$R_H = 3\pi/(8en).$$

Контрольная работа №4

Таблица вариантов

№	Номера задач								
0	410	420	430	440	450	460	470	480	490
1	401	411	421	431	441	451	461	471	481
2	402	412	422	432	442	452	462	472	482
3	403	413	423	433	443	453	463	473	483
4	404	414	424	434	444	454	464	474	484
5	405	415	425	435	445	455	465	475	485
6	406	416	426	436	446	456	466	476	486
7	407	417	427	437	447	457	467	477	487
8	408	418	428	438	448	458	468	478	488
9	409	419	429	439	449	459	469	479	489

401. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом с длиной волны $6 \cdot 10^{-5}$ см. Расстояние между отверстиями – 1 мм и расстояние от отверстий до экрана – 3 м. На каком расстоянии от центра экрана находятся три первые светлые полосы?

402. Во сколько раз увеличится ширина интерференционной полосы на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр заменить красным? Длина волны зеленого излучения равна $5 \cdot 10^{-5}$ см, красного – $6{,}5 \cdot 10^{-5}$ см.

403. На мыльную пленку ($n = 1{,}33$) падает белый свет под углом 45°. При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет ($\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см)?

404. Найти все длины волн видимого света (от 0,76 до 0,38 мкм), которые при оптической разности хода интерферирующих волн, равной 1,8 мм, будут: 1) максимально усилены; 2) максимально ослаблены.

405. На тонкий стеклянный клин в направлении нормали к его поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Определить угол между поверхностями клина, если расстояние между смежными интерференционными минимумами в отраженном свете равно 4 мм.

406. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом. Наблюдение ведется в отраженном свете. Радиусы двух соседних темных колец равны соответственно 4 и 4,38 мм. Радиус кривизны линзы равен 6,4 м. Найти порядковые номера колец и длину волны падающего света.

407. Установка для наблюдения колец Ньютона в отраженном свете освещается монохроматическим светом, падающим нормально. После того как пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнили жидкостью, радиусы темных колец уменьшились в 1,25 раза. Найти показатель преломления жидкости.

408. На щель шириной $2 \cdot 10^{-3}$ см нормально падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $5 \cdot 10^{-5}$ см. Найти ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на 1 м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума.

409. Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на миллиметр. На решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка? Найти общее число дифракционных максимумов.

410. Определить длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку с периодом 2,2 мкм, если угол между максимумами 2-го и 3-го порядков спектра равен 15°.

411. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры 2-го и 3-го порядков частично перекрываются. На какую длину волны в спектре 2-го порядка накладывается фиолетовая граница (λ = 0,4 мкм) спектра 3-го порядка?

412. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Угол дифракции для натриевой линии с длиной волны 589 нм составляет 17°8′. Некоторая линия дает в спектре 2-го порядка угол дифракции, равный 24°12′. Найти длину волны этой линии и число штрихов на 1 мм решетки.

413. Какой наименьшей разрешающей способностью должна обладать дифракционная решетка, чтобы с ее помощью можно было разрешить две спектральные линии калия (578 и 580 нм)? Какое наименьшее число штрихов должна иметь эта решетка, чтобы разрешение было возможно в спектре 2-го порядка?

414. Излучение рентгеновской трубки падает на кристалл кальция. Наименьший угол между плоскостью кристалла и пучком рентгеновских лучей равен 2°36′. Постоянная решетка кальцита равна $3{,}04 \cdot 10^{-8}$ см. Под каким напряжением работает рентгеновская трубка?

415. Чему равен показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления, равном 30°?

416. Предельный угол полного отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен 43°. Определить угол Брюстера для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

417. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, плоскости пропускания которых образуют между собой угол α. Интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9% интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Принимая коэффициент поглощения поляризатора и анализатора равным 0,08, найти угол α.

418. Чему равен угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через них, уменьшается в 4 раза? Поглощением света пренебречь.

419. Раствор глюкозы с концентрацией 280 кг/м^3, содержащейся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через этот раствор, на 32°. Определить концентрацию глюкозы в другом растворе, налитом в трубку такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол 24°.

420. Пластинку кварца толщиной 2 мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол 53°. Определить толщину пластинки, при которой данный монохроматический свет не проходит через анализатор.

421. Частица движется со скоростью, равной половине скорости света. Во сколько раз энергия движущейся частицы больше энергии покоя?

422. Электрон движется со скоростью, равной 0,6 скорости света. Определить импульс электрона и его кинетическую энергию.

423. Кинетическая энергия электрона равна 2 МэВ. Во сколько раз его энергия больше энергии покоя? Сделать такой же подсчет для протона.

424. Максимальная скорость фотоэлектронов, вылетающих из металла при облучении его γ-фотонами, равна $2{,}91 \cdot 10^8$ м/с. Определить энергию γ-фотона.

425. Вакуумный фотоэлемент, состоящий из центрального катода (вольфрамового шарика) и анода (внутренней поверхности колбы), освещается светом с длиной волны 230 нм. Какую задерживающую разность потенциалов надо приложить между электродами, чтобы фототок упал до нуля? При расчетах учесть, что между электродами существует контактная разность потенциалов 0,6 В, ускоряющая вылетающие из катода электроны. Работа выхода электронов из вольфрама равна 4,5 эВ.

426. Можно ли использовать барий в фотоэлементах для видимой области спектра, если работа выхода для бария – 2,5 эВ?

427. Рентгеновские лучи с длиной волны 0,02 нм испытывают комптоновские рассеяния под углом 90°. Найти: 1) изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии; 2) кинетическую энергию электрона при отдаче; 3) импульс электрона отдачи.

428. Определить импульс электрона отдачи при эффекте Комптона, если фотон с энергией, равной энергии покоя электрона, был рассеян на угол, равный 180°.

429. В результате комптоновского рассеяния γ-кванта с энергией 2 МэВ его длина волны изменилась на 30%. Определить кинетическую энергию электрона отдачи.

430. Какая доля энергии фотона при эффекте Комптона приходится на электрон отдачи, если фотон претерпел рассеяние на угол 180°? Энергия фотона до рассеяния равна 0,225 МэВ.

431. Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током 1 А до температуры T_1 = 1000 К. При какой величине тока нить накалится до температуры T_2 = 3000 К? Отношения энергетической светимости вольфрама к энергетической светимости абсолютно черного тела при температурах T_1 и T_2 равны 0,115 и 0,334, а удельные сопротивления вольфрама – $25{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и $96{,}2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м соответственно.

432. Температура вольфрамовой спирали в 25-ваттной электрической лампочке равна 2450 К. Отношение ее энергетической светимости к энергетической светимости абсолютно черного тела при данной температуре равно 0,3. Найти величину излучающей поверхности спирали.

433. Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке равен 0,3 мм, длина спирали – 5 см. При напряжении 127 В через лампочку течет ток 0,31 А. Найти температуру спирали. Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела считать для этой температуры равным 0,31.

434. Определить длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если источником света служит: 1) спираль электрической лампочки (T_1 = 3000 К); 2) солнце (T_2 = 6000 К). Считать, что источники излучают как абсолютно черное тело.

435. Вследствие изменения температуры абсолютно черного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости сместился с 2,4 мкм на 0,8 мкм. Как и во сколько раз изменились энергетическая светимость тела и максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости?

436. Мощность излучения абсолютно черного тела равна 10^8 Вт. Найти величину излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, равна $7 \cdot 10^{-5}$ см.

437. Найти давление света на поверхность колбы электрической 100-ваттной лампы. Колба лампы представляет собой сферический сосуд радиусом 5 см. Поверхность колбы лампы отражает 10% падающего света. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение.

438. Монохроматический пучок света с длиной волны 0,662 мкм падает нормально на поверхность с коэффициентом отражения 0,8. Определить количество фотонов, ежесекундно поглощаемых 1 см^2 поверхности, если давление света на поверхность равно 1 мкПа.

439. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 662 нм падает на зачерненную поверхность и производит на нее давление 0,3 мкПа. Определить концентрацию фотонов в световом пучке.

440. Ртутная дуга имеет мощность 127 Вт. Сколько квантов света испускается ежесекундно в излучении с длинами волн: 1) 612 нм; 2) 546 нм; 3) 365 нм? Интенсивность этих лучей равна, соответственно, 2%, 4%, 2,5% от интенсивности ртутной дуги. Считать, что 80% мощности идет на излучение.

441. Найти длину волны де Бройля для α - частицы, нейтрона и молекулы азота, движущихся со средней квадратичной скоростью при температуре 25°С.

442. Вычислить кинетическую энергию электрона, молекулы кислорода и частицы, радиус которой – 0,1 мкм и плотность – 2000 г/м^3, если каждой из этих частиц соответствует длина волны де Бройля 100 пм.

443. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов 510 кВ. Определить длину волны де Бройля, учитывая релятивистские эффекты.

444. На кристалл никеля падает под углом 64° к поверхности грани параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Расстояние между соседними плоскостями, параллельными грани кристалла, равно 200 пм. Пользуясь уравнением Вульфа-Брегга, найти скорость электронов, если при отражении наблюдается интерференционный максимум 1-го порядка.

445. Электронный пучок с постоянной скоростью падает на поверхность фторида лития. Найти ускоряющую разность потенциалов, при которой наблюдается второй дифракционный максимум под углом 1°30′. Расстояние между соседними атомными плоскостями равно 380 пм.

446. Какова неопределенность скорости электрона в атоме водорода? Во сколько раз неопределенность скорости больше скорости электрона на первой боровской орбите? Считать, что наибольшая ошибка в определении координаты электрона будет того же порядка, что и размер атома водорода ($d \approx 10^{-10}$м).

447. Длительность возбужденного состояния атома водорода соответствует примерно 10^{-7} с. Какова неопределенность энергии в этом состоянии?

448. Наименьшая неточность, с которой можно найти координату электрона в атоме водорода, – порядка 10^{-10} м. Найти неопределенность средней кинетической энергии электрона в невозбужденном атоме водорода.

449. Диаметр пузырька в жидководородной пузырьковой камере составляет величину порядка 10^{-7} м. Оценить неопределенность скоростей электрона и α-частицы в такой камере, если неопределенность координаты принять равной диаметру пузырька.

450. Ширина следа электрона на фотографии, полученной с помощью камеры Вильсона, составляет 10^{-3} м. Найти неопределенность скорости.

451. Во сколько раз увеличится радиус орбиты электронов у атома водорода, находящегося в основном состоянии, при возбуждении его фотоном энергией 12,09 эВ?

452. Пользуясь представлениями модели атома Резерфорда-Бора, вывести формулу скорости движения электрона по орбите. Вычислить его скорость на двух первых электронных круговых орбитах в атоме водорода. На какой орбите скорость электрона атома водорода равна 734 км/с?

453. Переход электрона в атоме водорода с n-й на k-ю орбиту ($k = 1$) сопровождается излучением фотона с длиной волны $\lambda =$ $= 102{,}6$ нм. Найти радиус n-й орбиты.

454. Атом водорода переведен из нормального состояния в возбужденное, характеризуемое главным квантовым числом 2. Найти энергию, необходимую для перевода атома водорода в указанное возбужденное состояние.

455. При переходе электрона водородного атома с одной из возможных орбит на другую, более близкую к ядру, энергия атома уменьшается на 1,892 эВ. Определить длину волны излучения.

456. Электрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 10^{-9} м с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти наименьшее значение энергии электрона.

457. Нейтрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 10^{-14} м с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти наименьшую разность энергий двух соседних энергетических уровней нейтрона.

458. Какова ширина одномерной потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками, если при переходе электрона со 2-го квантового уровня на 1-й излучается энергия 1 эВ? Как изменится излучаемая энергия, если ширина потенциальной ямы увеличится в 10 раз?

459. Определить, при какой ширине потенциального ящика дискретность энергии становится сравнимой с энергией теплового движения при температуре T.

460. Ширина запрещенной зоны алмаза – 6 эВ. Найти длинноволновую границу поглощения света алмазом.

461. Энергия Ферми при абсолютном нуле для натрия равна 3,15 эВ. Найти число свободных электронов, приходящихся на один атом натрия.

462. Концентрация свободных электронов проводимости в металлах равна $5\cdot10^{22}$ см$^{-3}$. Найти среднее значение энергии свободных электронов при абсолютном нуле.

463. Концентрация свободных электронов натрия равна $3\cdot10^{28}$ м$^{-3}$. Найти скорость электронов на уровне Ферми при абсолютном нуле.

464. Используя квантовую теорию теплоемкости Дебая, вычислить изменение молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его на 2 К от температуры $T = \theta_Д / 20$; $\theta_Д = 300$ К.

465. Пользуясь теорией теплоемкости Дебая, определить изменение молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $T_1 = 0{,}1\ \theta_Д$; $\theta_Д = 300$ К.

466. С помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле с магнитной индукцией B, наблюдают упругое рассеяние α-частиц на ядрах дейтерия. Найти начальную энергию α-частицы, если радиусы кривизны начальных участков траекторий ядра отдачи и рассеянной α-частицы оказались одинаковыми и равными r. Обе траектории лежат в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции магнитного поля. Заряд протона – q, его масса – M.

467. Камера Вильсона заполнена смесью водорода (H_2), паров спирта (C_2H_5CH) и воды (H_2O) и облучается потоком быстрых нейтронов. В некоторой точке имеет место распад ядра атома газа, заполняющего камеру, и наблюдаются треки двух протонов и двух α-частиц, начинающиеся в этой же точке. Ядро какого элемента распалось в указанной точке камеры?

468. Длина следа, а следовательно, и количество активизированных молекул бромистого серебра ($AgBr$) в фотоэмульсии, зависят от величины энергии пролетающей частицы. Сколько молекул $AgBr$ может активизировать α-частица с энергией 5 МэВ, если известно, что фотохимические изменения происходят в бромистом серебре при длине падающего света 600 нм?

469. Наблюдая за изменением количества ядер изотопа ${}_6C^{14}$ в изделиях из дерева, можно определить их возраст. Определить возраст изделия из дерева, если известно, что число ядер изотопа ${}_6C^{14}$ в нем уменьшилось в 3 раза по сравнению со свежей древесиной. Период полураспада ${}_6C^{14}$ составляет 5570 лет.

470. Сколько α-частиц излучает 1 г тория ${}_{90}T^{232}$ за 1 с?

471. Какое количество энергии освободится, если разделятся все ядра, содержащиеся в 1 г ${}_{92}U^{235}$? При делении ядра освобождается энергия 200 МэВ.

472. Сколько ядер ${}_{92}U^{235}$ должно делиться в 1 секунду, чтобы тепловая мощность ядерного реактора была равна 1 Вт? При каждом распаде ядра выделяется энергия 200 МэВ.

473. Тепловая мощность ядерного реактора – 10000 кВт. Какое количество ${}_{92}U^{235}$ потребуется употребить реактору в сутки? При каждом распаде ядра выделяется энергия 200 МэВ.

474. Атомная электростанция мощностью 500000 кВт имеет КПД 20%. Определить годовой расход ядерного горючего, если за каждый акт деления ${}_{92}U^{235}$ выделяется 200 МэВ энергии. Сравнить полученный результат с годовым расходом каменного угля тепловой электростанции той же мощности при КПД 75%. Теплота сгорания каменного угля – 30 МДж/кг.

475. Найти электрическую мощность атомной электростанции, расходующей 0,1 кг ${}_{92}U^{235}$ в сутки, если КПД станции равен 16%. За каждый акт деления ${}_{92}U^{235}$ выделяется 200 МэВ энергии.

476. Сколько ${}_{94}Pu^{239}$ производит реактор мощностью 100 МВт в течение месяца, если принять, что в среднем при одном акте деления ядра ${}_{92}U^{235}$ возникает 1,5 ядра плутония?

477. В проекте термоядерного реактора предполагается использовать реакцию ${}_1Д^2 + {}_1T^2 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1$. Однако трития в природе не существует. Его можно получать в том же реакторе за счет реакции ${}_3Li^6 + {}_0n^1 \rightarrow {}_2X^4 + {}_1T^3$. Пользуясь законами сохранения заряда и массы ядер, определить характеристики неизвестного ядра и энергию реакции.

478. Вычислить КПД двигателей атомного ледокола, если их мощность – $3{,}2 \cdot 10^4$ кВт, а атомный реактор расходует 200 г урана-235 в сутки. Вследствие деления одного ядра атома выделяется энергия 200 МэВ.

479. Сколько энергии выделится при ядерном делении урана ${}_{92}U^{235}$ массой 1 кг в урановом реакторе? Сколько угля необходимо сжечь для получения такого же количества теплоты? Удельная теплота сгорания угля равна 29,3 МДж/кг. Средняя энергия, выделившаяся при делении одного атома урана, составляет 200 МэВ.

480. При сгорании ядерного топлива на атомной электростанции за 1 с выделяется приблизительно 28,5 МДж энергии. Сколько ядерного горючего расходует станция за сутки, если принять, что один атом урана при делении на два осколка выделяет 200 МэВ энергии? КПД АЭС – 17%.

481. Мощность экспозиционной дозы, создаваемая удаленным источником γ-излучения с энергией фотонов 2 МэВ, равна 0,86 мкА/кг. Определить толщину свинцового экрана, снижающего мощность экспозиционной дозы до уровня предельно допустимой, равной 0,86 нА/кг (см. рис. 4.1).

482. На расстоянии 10 см от точечного источника γ-излучения мощность экспозиционной дозы – 0,86 нА/кг. На каком наименьшем расстоянии от источника экспозиционная доза излучения за рабочий день продолжительностью t = 6 ч не превысит предельно допустимую 5,16 мкКл/кг? Поглощением γ-излучения в воздухе пренебречь.

483. Мощность экспозиционной дозы γ-излучения на расстоянии 40 см от точечного источника равна 4,3 мкА/кг. Определить время, в течение которого можно находиться на расстоянии 6 м от источника, если предельно допустимую экспозиционную дозу принять равной 5,16 мкКг/кг. Поглощением γ-излучения в воздухе пренебречь.

484. На 1 см^2 поверхности кожи падает нормально 10^5 α-частиц с энергией 5 МэВ. Определить среднее значение поглощенной дозы (в греях и зивертах) в слое, равном глубине проникновения α-частиц в биологическую ткань. Известно, что пробег α-частиц в биологической ткани в 815 раз меньше пробега в воздухе. Для α-частиц коэффициент качества равен 10. Плотность биологической ткани равна плотности воды.

485. Какое количество α-частиц с энергией 4,4 МэВ, поглощенных 1 г биологической ткани, соответствует поглощенной дозе 0,5 Зв? Для α-частиц коэффициент качества равен 10.

486. На каком расстоянии от небольшого изотропного источника быстрых нейтронов интенсивностью $4\cdot10^7$ нейтрон мощность дозы нейтронного излучения будет равна предельно допустимой при 18-часовой рабочей неделе?

487. Эффективная вместимость ионизационной камеры карманного дозиметра равна 1 см^3, электроемкость – 2 пФ. Камера содержит воздух при нормальных условиях. Дозиметр был заряжен до потенциала 150 В. Под действием излучения потенциал понизился до 120 В. Определить дозу экспозиционного облучения, действию которого подвергается человек за сутки.

488. Собственный полупроводник (германиевый) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление 0,5 Ом·м. Определить концентрацию носителей тока, если подвижности электронов и дырок равны 38 м^2 / (В·с) и 0,18 м^2 / (В·с) соответственно.

489. Тонкая пластинка из кремния шириной 2 см помещена перпендикулярно магнитному полю, магнитная индукция которого равна 0,3 Тл. При плотности тока 2 мкА/мм^2, направленной вдоль пластины, холловская разность потенциалов оказалась 2,8 В. Определить концентрацию носителей тока.

490. Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равна 0,38 м^2 / (В·с) и 0,18 м^2 / (В·с). Вычислить постоянную Холла для кремния, если удельное сопротивление кремния равно $6{,}2 \cdot 10^2$ Ом·м.

Литература

Основная

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1985, 2000.

2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высш. школа, 2002.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 т. Т. 1-5. – М.: Наука, 1989, 2001.

4. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Высш. школа, 1981.

Дополнительная

1. Стрелков С.П. Механика. – М.: Наука, 1975.

2. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1977.

3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. – М.: Высш. школа, 1986.

4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М.: Высш. школа, 1987.

5. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высш. школа, 1983.

6. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высш. школа, 1985.

7. Матвеев А.Н. Атомная физика. – М.: Высш. школа, 1990.

8. Фирганг Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. – М.: Высш. школа, 1978.

9. Чертóв А.Г. Единицы физических величин. – М.: Высш. школа, 1977.

Содержание