

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

П.Г.Кужир  
В.А.Самойлюкович  
В.В.Зверева

## **Ф И З И К А**

Контрольные задания и учебные материалы

Учебно-методическое пособие для студентов-заочников  
инженерно-строительных специальностей

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом БНТУ*

Минск 2004

УДК 530.1(075.8)

ББК 22.3я7

К 88

**Рецензенты:**

канд. физ.-мат. наук, профессор И.А.Сатиков,

канд. физ.-мат. наук, доцент Е.В.Журавкевич

**Кужир П.Г.**

К 88      Физика. Контрольные задания и учебные материалы: Учебно-метод. пособие для студ.-заочников инженерно-строит. спец. / П.Г.Кужир, В.А.Самойлюкович, В.В.Зверева. – Мн.: БНТУ, 2004. – 140 с.

ISBN 985-479-095-9.

Учебно-методическое пособие содержит учебные материалы и контрольные задания по физике. Приведена рабочая программа по всем разделам физики, сформулированы методические требования, предъявляемые к выполнению и оформлению контрольных работ, приведены примеры решения задач.

**УДК 530.1(075.8)**

**ББК 22.3я7**

ISBN 985-479-095-9

© Кужир П.Г., Самойлюкович В.А.,  
Зверева В.В., 2004

## Предисловие

Данное учебно-методическое пособие ставит своей целью оказание помощи в изучении физики студентам-заочникам строительных специальностей. Знание законов физики предполагает не только умение формулировать законы, но и применять их при решении задач. Как правило, решение задач вызывает наибольшие затруднения у студентов-заочников. В соответствии с этим мы представили учебный материал таким образом, чтобы студенты самостоятельно смогли решать задачи своего варианта.

Даны методические указания к решению задач, помещен краткий перечень формул и законов, приведены примеры решения задач.

Затем дан набор задач для самостоятельного решения, состоящий из десяти вариантов. Задачи подобраны таким образом, чтобы уяснить понимание физических законов и развить у студента-заочника умение рассуждать.

Предполагается, что, работая с данным учебным пособием, студент-заочник будет использовать дополнительную литературу по курсу общей физики.

# **Рабочая программа курса физики для студентов-заочников строительных специальностей**

## *Введение*

Физика как наука. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Математика и физика. Физика и естествознание. Философия и физика. Важнейшие этапы истории физики. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Компьютеры в современной физике. Роль физики в становлении инженера. Роль измерений в физике. Единицы измерения и системы единиц. Основные единицы СИ.

## **1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**

Предмет механики. Классическая и квантовая механика. Нерелятивистская и релятивистская механика. Кинематика, динамика и статика. Основные физические модели: материальная точка, система материальных точек, абсолютно твердое тело, сплошная среда. Границы применимости классического способа описания движения.

### **Элементы кинематики**

Пространственно-временные отношения. Система отсчета. Скалярные и векторные физические величины.

Основные кинематические характеристики движения частиц. Скорость и ускорение. Кинематика вращательного движения твердого тела. Угловая скорость и угловое ускорение.

### **Элементы динамики материальной точки**

Основная задача динамики. Первый закон Ньютона. Понятие инерциальной системы отсчета. Масса, сила и импульс.

Второй закон Ньютона как уравнение движения. Третий закон Ньютона.

Силы трения. Упругие силы. Сила тяжести и вес.

## **Законы сохранения в механике**

Закон сохранения импульса. Центр инерции. Закон движения центра инерции.

Момент импульса. Момент силы. Уравнение моментов. Закон сохранения момента импульса.

Движение в центральном поле.

Работа и мощность. Коэффициент полезного действия (КПД).

Кинетическая энергия. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия и энергия взаимодействия. Закон сохранения полной механической энергии.

## **Элементы динамики твердого тела**

Момент импульса и момент инерции твердого тела относительно неподвижной оси.

Главные оси и главные моменты инерции твердого тела.

Моменты инерции некоторых тел правильной формы.

Теорема Штейнера.

Вращательный момент. Уравнение движения твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси.

Закон сохранения момента импульса твердого тела. Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа и мощность при вращении твердого тела.

## **Гармонические колебания**

Движение системы вблизи устойчивого положения равновесия. Модель гармонического осциллятора.

Примеры гармонических осцилляторов: груз на пружине, математический маятник, физический маятник, крутильный маятник.

Свободные незатухающие колебания. Параметры гармонических колебаний: амплитуда, круговая частота, фаза гармонических колебаний. Энергия гармонического осциллятора.

Свободные затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность.

Вынужденные колебания осциллятора под действием синусоидальной силы. Амплитуда и фаза при вынужденных колебаниях. Резонансные кривые. Процесс установления колебаний.

Принцип суперпозиции. Сложение гармонических колебаний. Векторные диаграммы. Биения. Фигуры Лиссажу.

### **Волновые процессы**

Волновое движение. Плоская бегущая волна. Длина волны, волновой вектор. Волновое уравнение.

Фазовая скорость и дисперсия волн. Волновой пакет. Групповая скорость.

Упругие волны в газах, жидкостях и твердых телах.

Энергетические характеристики упругих волн. Вектор Умова.

Сферические волны.

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

Природа звуковых волн.

Эффект Доплера.

Ультразвук. Элементы ультразвуковых технологий.

### **Элементы механики сплошных сред**

Общие свойства жидкостей и газов. Кинематическое описание движения жидкости.

Уравнение равновесия и движения жидкости.

Идеальная жидкость. Стационарное течение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли.

Вязкая жидкость. Силы внутреннего трения. Стационарное течение жидкости. Коэффициент вязкости.

Течение по трубе. Формула Пуазейля. Формула Стокса.

Гидродинамическая неустойчивость. Понятие о турбулентности.

Идеально упругое тело. Упругие деформации и напряжения. Закон Гука. Пластические деформации. Предел прочности.

### **Элементы релятивистской механики**

Инерциальные системы отсчета и принцип относительности в классической механике. Преобразование Галилея.

Принцип относительности в релятивистской механике. Постулаты специальной теории относительности.

Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца: относительность одновременности, релятивистские изменения интервала времени и интервала длины.

Пространственно-временной интервал.

Релятивистский закон сложения скоростей.

Релятивистский импульс. Полная энергия частицы.

Взаимосвязь массы и энергии.

Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции.

Понятие об общей теории относительности.

## **2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический и термодинамический методы. Макроскопическое состояние. Макроскопические параметры как средние значения. Тепловое равновесие. Равновесный процесс. Уравнение состояния.

### **Элементы молекулярно-кинетической теории и статистической физики**

Модель идеального газа. Уравнение состояния идеального газа.

Смесь идеальных газов. Закон Дальтона.

Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Молекулярно-кинетический смысл температуры.

Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул.

Внутренняя энергия идеального газа.

Микроскопические параметры. Вероятность и флуктуации.

Статистическое распределение Максвелла для молекул газа по скоростям и энергиям их хаотического движения.

Характерные скорости теплового движения.

Барометрическая формула.

Распределение Больцмана для молекул идеального газа, находящихся во внешнем потенциальном поле.

Энтропия и вероятность. Определение энтропии равновесной системы через статистический вес макросостояния.

Статистическое описание квантовой системы. Неразличимость одинаковых частиц в квантовой механике. Квантовые идеальные газы.

Понятие о физической кинетике. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул. Время релаксации.

Явление переноса в термодинамически неравновесных системах.

Опытные законы теплопроводности, диффузии и внутреннего трения.

Молекулярно-кинетическая теория этих явлений.

Вывод уравнения диффузии, теплопроводности и внутреннего трения.

## **Основы термодинамики**

Количество теплоты. Теплоемкость.

Работа газа при изменении его объема.

Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам и адиабатическому процессу идеального газа.

Политропические процессы.

Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса.

Классическая молекулярно-кинетическая теория теплоемкости идеальных газов и ее ограниченность.

Границы применимости закона равномерного распределения энергии и понятие о квантовании энергии вращения и колебаний молекул.

Обратимые и необратимые тепловые процессы. Круговой процесс (цикл).

Тепловые двигатели и холодильные машины.

Цикл Карно. Максимальный КПД тепловой машины. Метод циклов.

Энтропия и второе начало термодинамики.

Термодинамические потенциалы и условия равновесия.

Третье начало термодинамики (теорема Нернста).

Термодинамика неравновесных процессов. Макросистемы вдали от равновесия.

## **Реальные газы**

Отступление от законов идеальных газов. Реальные газы. Силы и потенциальная энергия межмолекулярных взаимодействий. Эффективный диаметр молекул.

Уравнение Ван-дер-Ваальса. Сравнение изотерм Ван-дер-Ваальса с экспериментальными изотермами.

Критическое состояние и параметры критического состояния.

Метастабильные состояния. Давление насыщенного пара.

Внутренняя энергия реального газа.

## **Жидкое состояние**

Строение жидкостей. Поверхностное натяжение. Давление под изогнутой поверхностью жидкости.

Явления на границе твердого тела и жидкости. Капиллярные явления.

## **Кристаллическое состояние**

Строение кристаллов. Классификация кристаллов. Типы кристаллических решеток.

Экспериментальные методы исследования кристаллов.

Точечные дефекты в кристаллах: вакансии, примеси внедрения, примеси замещения.

Краевые и винтовые дислокации. Дислокация и пластичность.

Механические свойства кристаллов.

Теплоемкость кристаллов при низких температурах.

## **Фазовые равновесия и фазовые превращения**

Фазы и условия равновесия фаз. Фазовые превращения. Фазовые переходы первого рода.

Фазовые диаграммы. Уравнения Клапейрона-Клаузиуса и диаграмма равновесных давлений и температур для двухфазных систем. Критическая точка.

Трехфазная система «твердое тело – жидкость – газ».

Обобщенная диаграмма состояния. Тройная точка.

Сверхтекучесть жидкого гелия.  
Фазовые переходы второго рода.

### **3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Предмет классической электродинамики. Электрический заряд и его дискретность. Закон сохранения электрического заряда. Идея близкодействия.

#### **Электростатика**

Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме. Применение теоремы Гаусса к расчету электростатического поля. Работа перемещения заряда в электростатическом поле. Теорема о циркуляции вектора напряженности электростатического поля. Потенциальный характер электростатического поля. Потенциал электростатического поля и его связь с напряженностью.

Идеальный проводник в электростатическом поле. Поверхностная плотность заряда. Граничные условия на границе “проводник-вакуум”. Электростатическое поле в полости идеального проводника. Электростатическая защита. Емкость уединенного проводника. Взаимная емкость двух проводников. Конденсаторы. Емкость конденсаторов различной геометрической конфигурации. Соединение конденсаторов. Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия системы заряженных проводников. Энергия заряженного конденсатора. Плотность энергии электростатического поля.

#### **Электростатическое поле в веществе**

Электрический диполь во внешнем электростатическом поле. Поляризация диэлектрика. Поляризованность. Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость. Основные уравнения электростатики диэлектриков. Граничные условия на границе раздела “диэлектрик-диэлектрик” и “проводник-диэлектрик”. Плотность энергии электростатического поля в диэлектрике. Электрострикция и пьезоэлектрический эффект. Сегнетоэлектрики.

## **Постоянный электрический ток**

Условия существования электрического тока. Проводники и изоляторы. Законы Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной форме. Сторонние силы. Электродвижущая сила (ЭДС). Источники ЭДС. Закон Ома для замкнутой цепи и для участка цепи, содержащего источник ЭДС. Законы Кирхгофа. Работа и мощность электрического тока. КПД электрической цепи. Нелинейные явления при постоянном токе.

Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Электропроводность слабоионизированных газов. Понятие о плазме. Дебаевская длина. Электропроводность плазмы. Области применения плазмы.

## **Магнитное поле постоянных токов**

Сила Лоренца. Магнитное поле движущегося заряда. Вектор магнитной индукции. Принцип суперпозиции. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитного поля. Магнитное поле прямолинейного проводника с током. Магнитное поле кругового тока. Вихревой характер магнитного поля. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции для магнитного поля в вакууме и его применение к расчету магнитного поля тороида и длинного соленоида.

Движение заряженных частиц в магнитном поле. Принцип действия циклических ускорителей заряженных частиц. Электронный микроскоп. Эффект Холла. МГД-генератор. Действие магнитного поля на проводник с током. Сила Ампера. Взаимодействие параллельных токов. Определение 1 ампера в СИ. Виток с током в магнитном поле. Момент сил, действующих на виток с током в магнитном поле. Магнитный момент. Энергия витка с током во внешнем магнитном поле.

Магнитный поток. Теорема Гаусса для магнитного поля в вакууме. Работа перемещения проводника с током в магнитном поле.

## **Магнитное поле в веществе**

Намагничивание вещества. Магнитные моменты атомов. Намагниченность. Напряженность магнитного поля. Магнитная прони-

цаемость. Основные уравнения магнитостатики в веществе. Граничные условия на поверхности раздела двух магнетиков. Магнитные цепи. Технические приложения законов магнитостатики.

Виды магнетиков. Пара- и диамагнетики. Ферромагнетики. Домены. Спиновая природа ферромагнетизма и ее объяснение на основе квантовых представлений. Точка Кюри. Магнитный гистерезис. Ферриты. Магнитострикция ферромагнетиков. Магнитный метод охлаждения. Применение магнитных материалов.

## **Электромагнитная индукция**

Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Токи Фуко. Скин-эффект. Ускоритель заряженных частиц – бетатрон. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при включении и отключении источника ЭДС в электрическую цепь. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля. Работа перемагничивания ферромагнетика.

## **Уравнения Максвелла. Электромагнитные волны**

Фарадеевская и максвелловская трактовки явления электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Инвариантность уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца. Относительность разделения электромагнитного поля на электрическое и магнитное поля.

Волновое уравнение для электромагнитного поля. Плоская электромагнитная волна. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия электромагнитной волны. Поток энергии. Плотность потока энергии. Вектор Умова-Пойнтинга. Излучение диполя.

## **Электромагнитные колебания**

Колебательный контур. Дифференциальное уравнение колебательного контура. Свободные электрические колебания в колебательном контуре. Вынужденные электрические колебания. Электрический резонанс. Переменный ток. Закон Ома для цепи переменного тока. Импеданс.

## Электроны в кристаллах

Элементы зонной теории кристаллов. Зонная структура энергетического спектра электронов. Уровень Ферми, поверхность Ферми. Число электронных состояний в зоне. Заполнение зон: металлы, полупроводники, диэлектрики.

Электропроводность металлов. Носители заряда в металлах. Недостаточность классической электронной теории. Электронный ферми-газ в металле. Носители тока как квазичастицы. Электронные теплоемкость и теплопроводность. Явление сверхпроводимости. Понятие о высокотемпературной сверхпроводимости. Туннельный контакт. Эффект Джозефсона и его применение. Квантование магнитного потока.

Электропроводность полупроводников. Собственные и примесные полупроводники. Понятие о  $p$ - $n$ -переходе. Полупроводниковый диод и транзистор и их вольт-амперные характеристики. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Контактные явления двух металлов. ТермоЭДС. Термопара.

Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов: нематики, холестерики, смектики. Примеры жидких кристаллов. Фазовые диаграммы. Упругие свойства нематиков. Поведение в электрическом и магнитном полях. Дисплеи на жидких кристаллах. Применение жидких кристаллов в технике. Полимеры.

## 4. ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

### Волновая оптика

Интерференция света. Когерентность световых волн. Степень монохроматичности световых волн. Время и длина когерентности. Радиус пространственной когерентности. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерференция многих волн. Интерферометры. Применение интерференции.

Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на одной и на многих щелях. Дифракционная решетка и спектральное разложение. Разрешающая способность опти-

ческих и спектральных приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа-Брэггов. Исследование структуры кристаллов. Понятие о голографии. Применение голографии.

Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса. Поляризация света при отражении от диэлектрика. Закон Брюстера. Изотропные и анизотропные среды. Оптическая анизотропия. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Поляроиды и поляризационные призмы. Вращение плоскости поляризации. Оптическая активность. Интерференция поляризованного света. Применение поляризованного света. Возникновение искусственной анизотропии под действием механических напряжений. Явление фотоупругости. Электрооптические и магнитооптические явления.

Поглощение света. Закон Бугера. Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсии. Групповая скорость. Электронная теория дисперсии света. Рассеяние света. Излучение Вавилова-Черенкова. Эффект Доплера. Понятие о нелинейной оптике.

### **Квантовая природа излучения**

Тепловое излучение. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа. Законы излучения абсолютно черного тела: закон Стефана-Больцмана, законы Вина. Противоречия классической физики. Квантовая гипотеза и формула Планка. Оптическая пирометрия.

Внешний фотоэффект и его законы. Энергия и импульс световых квантов. Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Многофотонный фотоэффект.

Давление света. опыты Лебедева. Квантовое и волновое объяснения давления света.

Эффект Комптона. Аннигиляция электронно-позитронной пары.

### **Экспериментальное обоснование основных идей квантовой механики**

Линейчатые спектры атомов. Правило частот Бора. Принцип соответствия. Опыт Франка и Герца. Опыт Штерна и Герлаха. Эффект Зеемана. Эффект Штарка.

## **АТОМЫ**

Стационарное уравнение Шредингера для атома водорода. Водородоподобные атомы. Энергетические уровни. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Спектры водородоподобных атомов. Пространственное распределение плотности вероятности для электрона в атоме водорода. Мезоатомы. Ширина уровней. Принцип Паули. Структура энергетических уровней в многоэлектронных атомах. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева.

## **Молекулы**

Молекула водорода. Физическая природа химической связи. Обменное взаимодействие. Ионная и ковалентная связи. Электронные, колебательные и вращательные состояния многоатомных молекул. Молекулярные спектры. Спектральный анализ. Люминисценция. Комбинационное рассеяние света. Понятие о парамагнитном резонансе.

## **Элементы квантовой электроники**

Квантовая теория излучения. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение фотонов. Коэффициенты Эйнштейна для переходов в двухуровневой системе. Принцип работы лазера. Свойства лазерного излучения. Различные типы лазеров. Применение лазеров.

## **Элементы физики ядра**

Строение атомного ядра. Модели ядра. Природа ядерных сил. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение атомных ядер. Взаимодействие радиационного излучения с веществом. Физические характеристики ионизирующих излучений. Биологическое действие ионизирующих излучений.

Ядерные реакции. Реакция ядерного деления. Цепная реакция деления ядер. Ядерный реактор. Идея бридерного ядерного реактора. Проблема источников энергии. Термоядерный синтез легких ядер. Энергия звезд. Проблема управляемого термоядерного синтеза.

## Современная физическая картина мира

Типы фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Частицы вещества (фермионы): кварки и лептоны. Калибровочные кванты взаимодействий (бозоны): глюоны, фотоны, промежуточные бозоны, гравитоны. Стандартная модель элементарных частиц. Единые теории взаимодействий: электрослабое, большое объединение, супергравитация и теория суперструн.

Вещество в экстремальных условиях: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры, квазары, темная материя. Реликтовое излучение и красное смещение. Горячая модель Вселенной и инфляционная (раздувающаяся) стадия ее развития. Модель рождения Вселенной при квантовых флуктуациях. Принцип причинности и физическая картина мира как философская категория.

## Методические указания по выполнению контрольных работ

По курсу физики студент-заочник должен выполнить контрольные работы, количество которых определено учебным планом специальности. При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие правила:

1. Номера задач, которые студент должен включить в свою контрольную работу, следует определить по таблице вариантов.
2. На титульном листе необходимо указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес.
3. Контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента.
4. Задачу своего варианта переписывать полностью, а заданные физические величины выписывать отдельно; при этом все численные величины должны быть представлены в одной системе величин (СИ).
5. Для пояснения решения задачи, где это нужно, сделать чертеж.
6. Решение задач и выбор используемых при этом формул следует сопровождать пояснениями.
7. В пояснениях к задаче необходимо указывать основные законы и формулы, на использовании которых базируется решение данной задачи.

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

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

10. Вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых значений в расчетную формулу.

11. Проверить единицы полученных величин по расчетной формуле, тем самым подтвердив ее правильность.

12. В контрольной работе следует указывать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

13. Результаты расчета следует округлять.

Правила округления следующие:

– при сложении и вычитании все слагаемые округляют так, чтобы они не имели значащих цифр в тех разрядах, которые отсутствуют хотя бы в одном из слагаемых;

– при умножении и делении исходные данные и результат округляют до такого числа значащих цифр, сколько их содержится в наименее точном числе;

– при возведении в степень в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их содержится в числе, возводимом в степень;

– при извлечении корня в окончательном результате количество значащих цифр должно быть таким, как в подкоренном выражении;

– в промежуточных вычислениях следует сохранять на одну цифру больше, чем рекомендуют правила, приведенные выше.

Значащими цифрами называют все цифры, кроме нуля, и нуль, если он стоит в середине числа или является представителем сохраненного десятичного разряда.

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, не относящиеся к требуемому варианту, засчитываться не будут.

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

# Основные определения и формулы

## Физические основы механики

Положение материальной точки в пространстве определяется радиус-вектором  $\vec{r}$ , т.е. вектором, проведенным из начала координат в данную точку пространства.

Перемещение  $\Delta \vec{r}$  точки есть вектор, проведенный из ее начального положения в конечное и равный приращению радиус-вектора данной точки.

Скорость материальной точки есть производная от радиус-вектора движущейся точки по времени:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Ускорение точки есть производная от скорости по времени или вторая производная от радиус-вектора движущейся точки по времени:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

В равномерном прямолинейном движении ( $\vec{v} = \text{const}$ ) выполняется соотношение

$$\Delta \vec{r} = \vec{v} \Delta t.$$

Формулы движения с постоянным ускорением ( $\vec{a} = \text{const}$ ):

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t;$$

$$\Delta \vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2},$$

где  $\vec{v}_0$  – начальная скорость.

В криволинейном движении точки полное ускорение  $\vec{a}$  есть векторная сумма тангенциального  $\vec{a}_\tau$  и нормального  $\vec{a}_n$  ускорений. Модуль полного ускорения равен

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2},$$

при этом

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}, \quad a_n = \frac{v^2}{R},$$

где  $R$  – радиус кривизны траектории в данной точке.

Среднее значение модуля скорости и ускорения точки в промежутке времени от  $t$  до  $t + \Delta t$  равно

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}, \quad \langle a \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

где  $\Delta S$  – путь, пройденный точкой за промежуток времени  $\Delta t$ , а  $\Delta v$  – изменение скорости за то же время.

Угловая скорость тела есть производная от угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Угловое ускорение тела есть производная от угловой скорости по времени или вторая производная от угла поворота по времени:

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

В равномерном вращательном движении ( $\omega = \text{const}$ ) выполняется соотношение

$$\varphi = \omega t.$$

Формулы равнопеременного вращательного движения тела вокруг неподвижной оси ( $\varepsilon = \text{const}$ )

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t ;$$

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2} .$$

Связь угловых величин с линейными

$$S = \varphi R, \quad v = \omega R, \quad a_\tau = \varepsilon R, \quad a_n = \omega^2 R ,$$

где  $S$  – путь, пройденный точкой вращающегося тела (длина дуги);

$R$  – расстояние от точки вращения до оси (радиус дуги).

Угловая скорость тела, вращающегося равномерно, связана с числом оборотов в секунду  $n$  (частотой) и периодом вращения  $T$  соотношением

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T} .$$

**Первый закон Ньютона:** всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.

Импульс материальной точки есть векторная величина:

$$\vec{p} = m\vec{v} .$$

Импульс системы материальных точек равен векторной сумме импульсов всех частиц, образующих систему:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i .$$

Второй закон Ньютона: ускорение материальной точки прямо пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Если на материальную точку одновременно действует несколько сил, то

$$\vec{a} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{F}_i}{m} = \sum_{i=1}^n \vec{a}_i.$$

**Второй закон Ньютона** можно сформулировать и таким образом: скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}.$$

Силы, рассматриваемые в механике:

а) сила упругости

$$F = -kx,$$

где  $k$  – коэффициент упругости (в случае пружины – жесткость);

$x$  – абсолютная деформация;

б) сила тяжести

$$P = mg;$$

в) сила гравитационного взаимодействия

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $G$  – гравитационная постоянная;

$m_1$  и  $m_2$  – массы взаимодействующих тел;

$r$  – расстояние между телами (тела рассматриваются как материальные точки);

$f$  – сила трения (скольжения)

$$F = f \cdot N,$$

где  $f$  – коэффициент трения;

$N$  – сила нормального давления.

Жесткость системы, состоящей из двух пружин с жесткостями  $k_1$  и  $k_2$ :

1) при параллельном соединении

$$k = k_1 + k_2;$$

2) при последовательном соединении

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}.$$

Систему взаимодействующих тел называют замкнутой, если на нее извне не действуют другие тела. Для такой системы выполняется закон сохранения импульса: импульс замкнутой системы есть величина постоянная, т.е.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const}.$$

Для двух тел закон сохранения импульса имеет вид

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2,$$

где  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  – скорости тел в начальный момент времени;

$\vec{u}_1$  и  $\vec{u}_2$  – скорости тех же тел в конечный момент времени.

Работа, совершаемая силой  $\vec{F}$  при элементарном перемещении  $\Delta \vec{r}$ , равна

$$\Delta A = \vec{F} \Delta \vec{r} = F \Delta S / \cos \alpha ,$$

где  $\Delta S = | \Delta \vec{r} |$  – элементарный путь;

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{F}$  и  $\Delta \vec{r}$  .

Работа переменной силы  $F$  на пути  $S$  из точки 1 в точку 2 равна

$$A = \int_1^2 F \cdot \cos \alpha \, dS .$$

Изменение полной энергии системы равно работе, совершенной внешними силами, приложенными к системе:

$$W_2 - W_1 = A_{\text{внеш}} .$$

Кинетическая энергия тела, движущегося поступательно со скоростью  $v$ :

$$W_k = \frac{mv^2}{2} \quad \text{или} \quad W_k = \frac{p^2}{2m} .$$

Работа  $A$ , совершаемая результирующей силой, определяется как мера изменения кинетической энергии материальной точки:

$$A = W_{k_2} - W_{k_1} .$$

Силы, действующие на материальную точку или тело, называются консервативными, если работа этих сил при перемещении точки (тела) зависит только от начального и конечного положений точки (тела) в пространстве и не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло.

Если на систему материальных точек действуют консервативные силы, то вводят понятие потенциальной энергии. Работа  $A_{12}$ , совершаемая консервативными силами, полностью определяется начальной и конечной конфигурацией системы:

$$A_{12} = W_{\pi_1} - W_{\pi_2} ,$$

где  $W_{\pi_1}$  – потенциальная энергия системы в начальном (1) и конечном (2) положении системы.

Потенциальная энергия:

а) упругодеформированной пружины

$$W_{\pi} = \frac{1}{2} kx^2,$$

где  $k$  – жесткость пружины;

$x$  – абсолютная деформация;

б) гравитационного взаимодействия

$$W_{\pi} = -\frac{G m_1 m_2}{r},$$

где  $G$  – гравитационная постоянная;

$m_1$  и  $m_2$  – массы взаимодействующих тел;

$r$  – расстояние между ними (тела рассматриваются как материальные точки);

в) тела, находящегося в однородном поле силы тяжести:

$$W_{\pi} = m g h,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$h$  – высота тела над уровнем, условно принятым за нулевой (формула справедлива при условии  $h \ll R$ , где  $R$  – радиус Земли).

Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия консервативной системы не изменяется с течением времени, т.е.

$$W = W_{\pi} + W_{\kappa} = \text{const}.$$

Консервативной системой называют систему, в которой действуют только консервативные силы.

Закон сохранения механической энергии, в частности, справедлив для замкнутой системы, т.е. системы, на которую внешние силы не действуют, а все внутренние силы являются консервативными.

Момент  $\vec{M}$  силы  $\vec{F}$  относительно центра вращения

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}],$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный из центра вращения в точку приложения силы.

Момент импульса материальной точки относительно центра вращения

$$\vec{L} = [\vec{r}, m\vec{v}],$$

где  $m\vec{v}$  – импульс этой точки,

$\vec{r}$  – ее радиус-вектор.

Момент инерции материальной точки относительно оси вращения

$$I = mr^2,$$

где  $m$  – масса точки;

$r$  – расстояние ее от оси вращения.

Момент инерции твердого тела равен сумме моментов инерции материальных точек, составляющих это тело:

$$I = \sum_{i=1}^n r_i^2 \Delta m_i.$$

Моменты инерции некоторых однородных тел вращения относительно их геометрических осей вращения:

– тонкостенный цилиндр  $I = mr^2$ ;

– сплошной цилиндр  $I = \frac{mr^2}{2}$ ;

– шар  $I = \frac{2mr^2}{5}$ .

Момент инерции однородного тонкого стержня длиной  $\ell$  относительно оси, проходящей через середину стержня перпендикулярно его длине:

$$I = \frac{m\ell^2}{12}.$$

Момент инерции  $I$  тела относительно любой оси вращения и момент инерции  $I_0$  тела относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр инерции тела, связаны соотношением (теорема Штейнера)

$$I = I_0 + md^2,$$

где  $m$  – масса тела;

$d$  – расстояние между осями.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно точки вращения

$$\sum_i \vec{M}_i = I\vec{\varepsilon},$$

где  $\sum_i \vec{M}_i$  – результирующий момент всех внешних сил, приложенных к телу,

$\vec{\varepsilon}$  – его угловое ускорение.

Основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси  $Z$

$$M_z = I_z\varepsilon,$$

где  $M_z$  – результирующий момент внешних сил, действующих на тело, относительно оси  $Z$ ;

$\varepsilon$  – угловое ускорение;

$I_z$  – момент инерции относительно оси вращения  $Z$ .

Момент импульса симметричного твердого тела относительно центра вращения равен произведению момента инерции тела на угловую скорость:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}.$$

Момент импульса системы тел есть векторная сумма моментов импульсов всех тел системы:

$$\vec{L} = \sum \vec{L}_i = \sum I_i \vec{\omega}_i .$$

Закон сохранения момента импульса относительно точки  $O$ : если результирующий момент внешних сил, приложенных к системе, равен нулю ( $\vec{M} = 0$ ), то момент импульса системы есть величина постоянная, т.е.

$$\vec{L} = \text{const} .$$

Проекция на ось  $Z$  момента импульса тела, вращающегося относительно неподвижной оси  $Z$ :

$$L_z = I_z \omega ,$$

где  $\omega$  – угловая скорость тела.

Закон сохранения момента импульса системы тел, вращающихся вокруг неподвижной оси  $Z$ :

$$I_z \omega = \text{const} ,$$

где  $I_z$  – момент инерции системы тел относительно оси  $Z$ ;

$\omega$  – угловая скорость вращения тел системы вокруг оси  $Z$ .

Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси  $Z$ :

$$W_k = \frac{1}{2} I_z \omega^2 \quad \text{или} \quad W_k = \frac{L_z^2}{2I_z} .$$

При повороте тела относительно оси  $Z$  на угол  $d\varphi$  совершается работа

$$dA = M_z d\varphi .$$

Смещение частицы от положения равновесия, ее скорость и ускорение при гармонических колебаниях определяется уравнениями

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad v = \dot{x} = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0), \\ a = \dot{v} = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x,$$

где  $A$  – амплитуда колебания;  
 $\omega$  – циклическая частота;  
 $\varphi_0$  – начальная фаза.

Циклическая частота  $\omega$ , период колебаний  $T$  и частота  $\nu$  связаны соотношениями

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинакового периода получается гармоническое колебание того же периода  $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ , амплитуда которого  $A$  и начальная фаза  $\varphi$  определяются уравнениями

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}; \\ \operatorname{tg}\varphi = \frac{A_1 \sin\varphi_1 + A_2 \sin\varphi_2}{A_1 \cos\varphi_1 + A_2 \cos\varphi_2},$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды складываемых колебаний;  
 $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – их начальные фазы.

Сила, действующая на тело при свободном гармоническом колебании (квазиупругая сила), всегда пропорциональна смещению и направлена в сторону, противоположную смещению:

$$F = ma = -m\omega_0^2 x = -kx,$$

где  $k = m\omega_0^2$  – коэффициент квазиупругой силы, определяемый силой, вызывающей смещение  $x$ , равное единице.

При отсутствии сопротивления среды циклическая частота  $\omega_0$  свободных гармонических колебаний, называемая собственной циклической частотой, и период  $T$  равны

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Период колебаний математического маятника длиной  $\ell$  равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}.$$

Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}},$$

где  $I$  – момент инерции маятника относительно оси качания;

$d$  – расстояние от оси до его центра тяжести.

Полная энергия тела, совершающего свободные незатухающие гармонические колебания, постоянна и равна

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

Уравнение смещения в затухающих колебаниях при наличии силы сопротивления  $F_{\text{сопр}}$ , пропорциональной скорости ( $F_{\text{сопр}} = -rv$ , где  $r$  – коэффициент сопротивления), имеет вид

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

Здесь  $A_0 e^{-\beta t}$  – убывающая во времени амплитуда смещения;  $\beta$  – коэффициент затухания;  $\omega$  – циклическая частота;  $A_0$ ,  $\varphi_0$  – начальная амплитуда и фаза (определяются из начальных условий).

Величины  $\beta$  и  $\omega$  выражаются через параметры системы  $r$ ,  $m$ ,  $k$  согласно формулам

$$\beta = \frac{r}{2m},$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}.$$

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \beta T,$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды двух последовательных колебаний.  
Амплитуда вынужденных колебаний

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}},$$

где  $h$  есть отношение амплитуды вынуждающей силы к массе тела;  
 $\omega_0$  – собственная циклическая частота;  
 $\omega$  – циклическая частота вынуждающей силы.  
Резонансная циклическая частота равна

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

## Статистическая физика. Термодинамика

Идеальным газом называют газ, молекулы которого имеют пренебрежимо малый собственный объем и не взаимодействуют друг с другом на расстоянии.

Нормальные условия:  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па,  $T_0 = 243,15$  К.

**Закон Бойля-Мариотта:** для данной массы газа и при  $T = \text{const}$  (изотермический процесс)

$$pV = \text{const} .$$

**Закон Шарля:** для данной массы газа и при  $V = \text{const}$  (изохорический процесс)

$$\frac{p}{T} = \text{const} .$$

**Закон Гей-Люссака:** для данной массы газа и при  $p = \text{const}$  (изобарический процесс)

$$\frac{V}{T} = \text{const} .$$

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

$$pV = \frac{m}{M} RT ,$$

где  $m$  – масса газа;

$R$  – молярная газовая постоянная ( $R = 8,31$  Дж/(моль·К));

$M$  – молярная масса газа.

Единица количества вещества в СИ – моль.

Моль – количество вещества системы, в котором содержится столько же структурных элементов (молекул, атомов), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода с атомной массой 12 ( $^{12}\text{C}$ ).

Моли разных газов содержат одинаковое число молекул, называемое числом Авогадро:  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

Молярная масса

$$M = m_0 \cdot N_A ,$$

где  $m_0$  – масса одного структурного элемента (атома, молекулы).

Поэтому

$$v = \frac{m}{M} = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} = \frac{N}{N_A} .$$

**Закон Дальтона:** давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = \sum p_i .$$

Барометрическая формула, выражающая убывание давления газа с высотой  $h$  над поверхностью Земли:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} ,$$

где  $p_0$  – давление на высоте  $h = 0$ ;

$T$  – температура газа;

$g$  – ускорение силы тяжести.

Средняя квадратичная скорость

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}} ; \quad \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \langle v^2 \rangle ,$$

где  $v_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) – скорость  $i$ -й частицы;

$N$  – число частиц в газе.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 ,$$

где  $n$  – число молекул в единице объема (концентрация молекул);

$\langle \varepsilon \rangle = \langle m_0 v^2 \rangle / 2$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы. Для однородного по составу частиц газа

$$\langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle = \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} ,$$

где  $m_0$  – масса одной частицы газа. Для смеси идеальных газов  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_N$ .

Зависимость средней кинетической энергии поступательного движения молекул от температуры

$$\langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle = (3/2) kT,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, равная

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Среднеквадратичная скорость поступательного движения молекул газа

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Наиболее вероятная скорость молекул

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$$

Средняя арифметическая скорость поступательного движения молекул идеального газа:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}.$$

Зависимость давления газа от концентрации  $n$  молекул и температуры  $T$

$$p = n kT.$$

Числом степеней свободы  $i$  называется число независимых величин, с помощью которых может быть задано положение тела или

частицы в пространстве. Для молекул одноатомного газа  $i = 3$  (три поступательные степени свободы), двухатомного газа  $i = 5$  (три поступательные и две вращательные степени свободы), трех- и более атомных газов  $i = 6$  (три поступательные и три вращательные степени свободы).

Средняя кинетическая энергия (поступательного и вращательного движения) молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT.$$

Среднее число столкновений, испытываемых одной молекулой за секунду:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle,$$

где  $d$  – эффективный диаметр молекулы;

$n$  – концентрация молекул.

Общее число столкновений всех молекул друг с другом в единице объема за единицу времени

$$Z = \frac{1}{2} \langle z \rangle n.$$

Средняя длина свободного пробега молекулы

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

Уравнение диффузии (закон Фика):

$$dm = -D \frac{dp}{dx} dS dt,$$

где  $\frac{dp}{dx}$  – градиент плотности;

$dm$  – масса, переносимая при диффузии за время  $dt$  через малую площадь  $dS$ , расположенную перпендикулярно к оси  $OX$ , вдоль которой осуществляется перенос;

$D$  – диффузия (коэффициент диффузии):

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle.$$

Сила внутреннего трения в жидкости (газе), действующая на элемент поверхности слоя  $dS$ :

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} dS,$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения):

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle = D \rho;$$

$\frac{dv}{dx}$  – изменение скорости движения слоев на единицу длины в направлении нормали к поверхности слоя;

$\rho$  – плотность газа или жидкости.

Уравнение теплопроводности (закон Фурье)

$$dQ = -K \frac{dT}{dx} dS dt,$$

где  $dQ$  – количество теплоты, проходящей при теплопроводности за время  $dt$  через площадь  $dS$ , расположенную перпендикулярно к оси  $OX$ , в направлении которой осуществляется перенос тепла;

$K$  – теплопроводность (коэффициент теплопроводности);

$dT/dx$  – градиент температуры.

$$K = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle = \eta c_v,$$

$c_v$  – удельная теплоемкость газа в изохорическом процессе.

**Первое начало термодинамики:** количество теплоты, сообщенное системе, идет на увеличение ее внутренней энергии и совершение системой работы над окружающими телами:

$$Q = \Delta U + A.$$

Изменение внутренней энергии для идеального газа

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Молярная теплоемкость измеряется количеством теплоты, необходимым для нагревания одного моля вещества на один Кельвин:

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT},$$

где  $\nu = m/M$  – количество вещества.

Удельная теплоемкость измеряется количеством теплоты, необходимым для нагревания единицы массы вещества на один Кельвин, т.е.

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}.$$

Связь между удельной и молярной теплоемкостями

$$c = C/M.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме

$$C_V = iR/2.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении

$$C_p = C_V + R = (i + 2) R/2.$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{m}{M} C_V T.$$

При элементарном изменении объема газа совершается работа

$$dA = p dV.$$

В произвольном термодинамическом процессе

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

Работа идеального газа при изобарном процессе

$$A = p (V_2 - V_1).$$

Работа идеального газа при изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Уравнение Пуассона для адиабатического процесса в идеальном газе

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где  $\gamma = C_p/C_V$  – отношение молярных (или удельных) теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме.

Работа идеального газа при адиабатическом процессе выражается следующими формулами:

$$A = -\Delta U = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2);$$

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right].$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где  $A$  – работа, совершенная рабочим веществом в течение цикла;

$Q_1$  – количество теплоты, полученное от нагревателя за это время рабочим веществом;

$Q_2$  – количество теплоты, отданное им при этом холодильнику;

$T_1$  и  $T_2$  – наивысшая и наименьшая температуры рабочего вещества.

Знак равенства в формуле для  $\eta$  относится только к машине, работающей по циклу Карно.

Изменение энтропии тела в любом обратимом процессе, переводящем его из состояния  $A$  в состояние  $B$ , равно

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T},$$

где  $dQ$  – элементарное количество теплоты, полученное телом при температуре  $T$ .

Второе начало термодинамики: энтропия замкнутой системы при любых происходящих в ней процессах не уменьшается – она возрастает при необратимых процессах и остается постоянной в случае обратимых процессов, т.е

$$\Delta S \geq 0.$$

## Электростатика

В электростатике изучаются взаимодействие и свойства систем электрических зарядов, которые неподвижны относительно выбранной инерциальной системы отсчета.

Существует два вида электрических зарядов: положительные и отрицательные. Заряженные тела взаимодействуют: разноименно заряженные тела притягиваются, а одноименно заряженные тела отталкиваются.

Заряд электрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл; масса электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг, масса протона  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$  кг.

Закон Кулона: сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов, находящихся в вакууме, равна

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – величины зарядов;

$r$  – расстояние между ними;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная. Сила  $\vec{F}$  направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

Если заряд  $q$  взаимодействует с зарядами  $q_1, q_2, \dots, q_N$ , то результирующая сила определяется формулой

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i,$$

где  $\vec{F}_i$  – сила, с которой взаимодействуют заряды  $q$  и  $q_i$  в отсутствие остальных  $N-1$  зарядов.

Взаимодействие неподвижных зарядов осуществляется посредством электрического поля. Движущиеся заряды взаимодействуют друг с другом посредством не только электрического, но и магнитного полей.

Количественной характеристикой силового воздействия электрического поля на заряженные частицы является напряженность электрического поля  $\vec{E}$ . Напряженность электрического поля в данной точке численно равна силе  $\vec{F}$ , действующей на единичный точечный заряд, помещенный в рассматриваемую точку поля, т.е.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Электрическое поле называется однородным, если в любой его точке вектор напряженности  $\vec{E}$  имеет постоянную величину и направление.

Модуль напряженности электрического поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом  $q$ , в точке, удаленной от него на расстояние  $r$ , равен

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}.$$

Напряженность поля в вакууме, создаваемого зарядом  $q$ , равномерно распределенным по сферической поверхности радиуса  $R$ , равна

$$\text{а) } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}, \text{ если } r \geq R;$$

$$\text{б) } E = 0, \text{ если } r < R.$$

Напряженность поля в вакууме бесконечно длинной равномерно заряженной нити (цилиндра) радиуса  $R$  равна

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}, \text{ если } r \geq R,$$

где  $r$  – расстояние от центра нити (цилиндра) до точки, где исследуется электрическое поле;

$\tau$  – линейная плотность заряда, численно равная заряду, приходящемуся на единицу длины нити (цилиндра), т.е.

$$\tau = \frac{dq}{dl}.$$

$$\text{Для равномерно заряженной нити } \tau = \frac{q}{l}.$$

Напряженность однородного электростатического поля в вакууме бесконечной равномерно заряженной плоскости равна

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда, численно равная заряду, приходящемуся на единицу площади заряженной поверхности, т.е.

$$\sigma = \frac{dq}{dS}.$$

В случае равномерной плотности заряда  $\sigma = \frac{q}{S}$ .

Напряженность однородного поля двух бесконечных параллельных равномерно заряженных с поверхностной плотностью заряда  $+\sigma$  и  $-\sigma$  плоскостей (поле плоского конденсатора) в точках, расположенных между плоскостями и вне их, соответственно равна

$$\text{а) } E_{\text{внутр}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0};$$

$$\text{б) } E_{\text{внеш}} = 0.$$

Принцип суперпозиции электрических полей: напряженность  $\vec{E}$  поля системы из  $N$  неподвижных зарядов равна

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i,$$

где  $\vec{E}_i$  – напряженность поля, созданного зарядом  $q_i$ .

Элементарный поток  $d\Phi$  вектора напряженности  $\vec{E}$  через участок поверхности, имеющей площадь  $dS$ , определяется равенством

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} = E dS \cos \left( \vec{E}, \hat{\vec{n}} \right) = E_n dS,$$

где  $\hat{\vec{n}}$  – единичный вектор нормали к площадке  $dS$ , причем  $d\vec{S} = dS \hat{\vec{n}}$ .

Поток  $\Phi$  вектора  $\vec{E}$  через поверхность  $S$  равен

$$\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}.$$

**Теорема Остроградского-Гаусса** для электростатического поля в вакууме: поток вектора напряженности сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме охватываемых этой поверхностью электрических зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_N$ , деленной на  $\epsilon_0$ :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S E_n \, dS = \sum_{i=1}^N q_i / \epsilon_0.$$

Работа, которая совершается при перемещении электрического заряда  $q$  в электростатическом поле, не зависит от формы траектории, по которой происходит перемещение, а зависит только от начального и конечного положения заряда. Значит, электростатические силы являются консервативными. Работа, совершаемая силами электростатического поля по перемещению заряда  $q$  из точки 1 в точку 2, равна

$$A = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где  $\Delta W_p$  – изменение потенциальной энергии заряда  $q$  при его перемещении из точки 1 в точку 2;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы поля в точках поля 1 и 2.

Потенциал электростатического поля численно равен потенциальной энергии, которой обладал бы единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, т.е.

$$\varphi = W_p / q.$$

Циркуляцией вектора напряженности вдоль замкнутого контура  $L$  называется интеграл

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \oint_L E \, d\ell \cos(\vec{E}, d\vec{\ell}).$$

Этот интеграл численно равен работе, которую совершают электростатические силы при перемещении единичного положительного электрического заряда по замкнутому пути. Так как электрические силы консервативны, то работа по замкнутому пути будет равна нулю. Тогда

$$\oint_L \vec{E} \, d\vec{\ell} = 0,$$

а силовое поле, которое удовлетворяет этому условию, называют потенциальным.

Потенциальная энергия электростатического взаимодействия системы  $n$  точечных зарядов равна

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i^*,$$

где  $\varphi_i^* = \sum_{\substack{k=1 \\ (k \neq i)}}^n \varphi_{ik}$  – потенциал, создаваемый всеми зарядами, кроме  $q_i$ ,

в точке нахождения  $i$ -го заряда, т.е.  $\varphi_{ik} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_k}{r_{ik}}$  – потенциал, создаваемый зарядом  $q_k$  в точке нахождения заряда  $q_i$  ( $r_{ik}$  – расстояние между  $i$ -м и  $k$ -м зарядами).

Потенциальная энергия электростатического взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$ , равна

$$W_p = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r},$$

при условии, что  $W_p$  на бесконечности равна нулю.

Потенциал поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r}.$$

Потенциал поля сферической поверхности радиуса  $R$ , по которой равномерно распределен заряд  $q$ , равен:

а) для точек, лежащих вне сферы на расстоянии  $r$  от ее центра:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}, \quad r > R;$$

б) для точек, лежащих на поверхности сферы или внутри нее:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}, \quad r \leq R.$$

Потенциал равномерно заряженной нити (цилиндра) радиуса  $R$  на расстоянии  $r \geq R$  от центра нити равен

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r}.$$

Связь потенциала с напряженностью поля

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left( \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right).$$

Для однородного поля

$$E = (\varphi_1 - \varphi_2)/d = -\Delta\varphi/d,$$

где  $d$  – расстояние между эквипотенциальными поверхностями с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Для электростатического поля, обладающего центральной или осевой симметрией, справедливо соотношение

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \quad \text{или} \quad \varphi = -\int E dr.$$

При внесении проводника в электрическое поле в любой точке внутри проводника напряженность установившегося электрического поля равна нулю. На поверхности проводника вектор  $\vec{E}$  направлен по нормали к поверхности. Вблизи поверхности проводника

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

Электрический момент диполя

$$\vec{p} = |q| \vec{\ell},$$

$\vec{\ell}$  – плечо диполя (вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному).

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика, состоящая в том, что в любом элементарном объеме  $\Delta V$  возникает суммарный дипольный момент молекул, отличный от нуля.

Количественной мерой поляризации диэлектрика является вектор поляризации (поляризованность)  $\vec{P}$ :

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i,$$

где  $\vec{p}_i$  – электрический дипольный момент  $i$ -й молекулы;

$N$  – общее число молекул в объеме  $\Delta V$ .

Для изотропного диэлектрика вектор  $\vec{P}$  пропорционален напряженности  $\vec{E}$  поля внутри него:

$$\vec{P} = \aleph \epsilon_0 \vec{E},$$

где  $\aleph$  – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Поверхностная плотность  $\sigma_{\text{св}}$  связанных зарядов равна проекции вектора  $\vec{P}$  на внешнюю нормаль к поверхности диэлектрика:

$$\sigma_{\text{св}} = P_n.$$

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  диэлектрика показывает, во сколько раз электрическое поле в диэлектрике меньше, чем внешнее электрическое поле.

Для изотропного диэлектрика векторы электрического смещения  $\vec{D}$  и напряженности  $\vec{E}$  поля связаны формулой

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E},$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, равная

$$\epsilon = 1 + \aleph.$$

Теорема Остроградского-Гаусса для электрического поля в диэлектрике: поток вектора  $\vec{D}$  через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри нее свободных зарядов, т.е.

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_S D_n \, dS = \sum_i q_i.$$

Отношение заряда  $q$  уединенного проводника к его потенциалу  $\varphi$  называют емкостью данного проводника:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Емкость уединенного шара радиуса  $R$  равна

$$C = 4\pi \epsilon \epsilon_0 R.$$

Взаимная емкость двух близкорасположенных друг от друга проводников, заряженных равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку зарядами  $q$ , равна

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U},$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$  – разность потенциалов между двумя заряженными проводниками.

Емкость плоского конденсатора равна

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  – площадь пластины;

$d$  – расстояние между пластинами.

Емкость  $C$  батареи из  $n$  конденсаторов, соединенных параллельно, равна

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Емкость  $C$  батареи из  $n$  конденсаторов, соединенных последовательно, определяется соотношением

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

Энергия уединенного заряженного проводника равна

$$W = \frac{1}{2} C \varphi^2 = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} q \varphi.$$

Объемная плотность энергии электрического поля  $w$  (энергия единицы объема пространства, в котором сосредоточено электрическое поле) равна

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{E D}{2} = \frac{D^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0}.$$

Сила взаимодействия пластин плоского конденсатора

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S E^2}{2}.$$

## Постоянный ток. Электромагнетизм

Электрический ток – упорядоченное движение электрических зарядов.

Условия, необходимые для появления и существования электрического тока в проводящей среде:

- наличие в среде свободных носителей тока, т.е. заряженных частиц, способных упорядоченно перемещаться;
- существование в данной среде электрического поля или сторонних сил.

Сила тока измеряется количеством электричества, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Электрический ток называется постоянным, если сила тока и его направление не изменяются с течением времени. Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t},$$

где  $q$  – электрический заряд, переносимый через поперечное сечение проводника за промежуток времени от 0 до  $t$ .

Направлением электрического тока считается направление упорядоченного движения положительных зарядов. В металлических проводниках ток представляет собой упорядоченное движение отрицательных зарядов (электронов), которые движутся в направлении, противоположном направлению тока.

Плотность тока  $j$  определяется силой тока, отнесенной к единице площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного движению заряженных частиц, т.е.

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS}.$$

Связь между вектором плотности тока  $\vec{j}$  и элементом силы тока  $dI$

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{S} = j dS \cos \alpha,$$

где  $d\vec{S} = \vec{n} dS$ ;

$\vec{n}$  – единичный вектор нормали к площадке  $dS$ , составляющей с вектором  $\vec{j}$  угол  $\alpha$ .

Сила тока  $I$  через произвольную поверхность  $S$  равна

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S j dS \cos \alpha.$$

Для металлического проводника

$$\vec{j} = n_0 e \langle \vec{v} \rangle,$$

где  $n_0$  – число электронов проводимости в единице объема;

$e$  – абсолютная величина заряда электрона;

$\langle \vec{v} \rangle$  – средняя скорость упорядоченного движения электронов под действием электрического поля.

Закон Ома для плотности тока (закон Ома в дифференциальной форме)

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E},$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость (удельная электропроводность);

$\rho$  – удельное сопротивление.

Величина  $\mathcal{E}$ , равная работе  $A$  сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС), т.е.

$$\mathcal{E} = A/q.$$

Напряжением  $U_{12}$  на участке 1-2 называется величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами над единичным положительным зарядом при перемещении из точки 1 в точку 2 электрической цепи:

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12},$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов на концах участка цепи 1-2;  
 $\mathcal{E}_{12}$  – ЭДС на участке 1-2.

Напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в том случае, если на участке не приложены ЭДС (однородный участок), т.е.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Участок, на котором действуют сторонние и электростатические силы, называют неоднородным.

Сопротивление  $R_{12}$  участка цепи между сечениями 1 и 2 равно

$$R_{12} = \int_1^2 \rho \frac{d\ell}{S}.$$

Для однородного линейного проводника  $\rho = \text{const}$ ,  $S = \text{const}$ , сопротивление равно

$$R = \rho \frac{\ell}{S},$$

где  $\ell$  – длина проводника.

Закон Ома для участка однородной (т.е. не содержащей электродвижущих сил) цепи

$$I = \frac{U}{R},$$

где  $U$  – разность потенциалов на концах участка;  
 $R$  – его сопротивление.

Закон Ома для участка неоднородной (т.е. содержащей электродвижущую силу) цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R + r},$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов на концах участка;

$\mathcal{E}_{12}$  – электродвижущая сила (ЭДС), действующая на данном участке;

$R$  – сопротивление всей внешней цепи;

$r$  – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Если цепь замкнута, то  $\varphi_1 = \varphi_2$  и закон Ома для замкнутой цепи будет иметь вид

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Следовательно, сила тока в замкнутой цепи пропорциональна электродвижущей силе  $\mathcal{E}$ , действующей в этой цепи, и обратно пропорциональна ее полному сопротивлению  $R + r$ .

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей:

1) алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в любом узле, равна нулю, т.е.

$$\sum I_i = 0.$$

Узлом в сложной (разветвленной) цепи называется точка, в которой сходятся не менее трех проводников;

2) для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum I_i R_i = \sum \mathcal{E}_i.$$

Для первого правила Кирхгофа токи считаются положительными, если они входят в узел; выходящие из узла токи считаются отрицательными. Для применения второго правила Кирхгофа выбира-

ется направление обхода контура. Положительными считаются токи, направление которых совпадает с направлением обхода контура. ЭДС источника считается положительной, если источник создает ток, направление которого совпадает с направлением обхода контура. В противном случае токи и ЭДС считаются отрицательными.

Общее сопротивление  $n$  участков при их последовательном соединении равно

$$R = \sum_{i=1}^n R_i .$$

Общее сопротивление  $n$  участков при их параллельном соединении определяется на основании соотношения

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} .$$

Работа электрических сил на участке цепи, между концами которого имеется разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ , равна

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2) I t .$$

Количество теплоты, выделенное на участке цепи сопротивлением  $R$ , по которому в течение времени  $t$  идет ток силой  $I$ , определяется соотношением (закон Джоуля-Ленца)

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = I U t .$$

Если сила тока изменяется со временем, то

$$dQ = I^2 R dt; \quad Q = R \int_{t_1}^{t_2} I^2 dt .$$

Полная работа, совершенная источником электрического тока за время  $t$ , равна

$$A = \mathcal{E} I t = I^2 (R + r)t = (\mathcal{E}^2 t)/(R + r),$$

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника;

$R$  – сопротивление внешней цепи;

$r$  – внутреннее сопротивление источника.

Полезная работа равна

$$A_{\text{п}} = U I t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t,$$

где  $U$  – падение напряжения на сопротивлении внешней цепи.

Разделив работу  $A$  на время  $t$ , за которое она совершается, получим:

а) полную мощность источника тока

$$P = \mathcal{E} I = I^2 (R + r) = \mathcal{E}/(R + r);$$

б) полезную мощность, т.е. мощность, потребляемую внешней электрической цепью:

$$P_{\text{п}} = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R},$$

где  $U = IR$  – падение напряжения на сопротивлении  $R$  внешней цепи.

Коэффициент полезного действия источника тока

$$\eta = \frac{P_{\text{п}}}{P} = \frac{R}{R + r}.$$

Магнитным полем называется одна из форм электромагнитного поля. Магнитное поле создается движущимися заряженными частицами и токами.

Сила  $d\vec{F}$ , действующая на элемент длины проводника с током  $I$ , помещенного в магнитное поле (сила Ампера), равна

$$d\vec{F} = I [d\vec{\ell}, \vec{B}],$$

где  $d\vec{\ell}$  – вектор элемента длины проводника, проведенный в направлении тока;

$\vec{B}$  – вектор магнитной индукции.

Магнитное поле называется однородным, если вектор  $\vec{B}$  в любой его точке постоянен по модулю и по направлению.

Если магнитное поле однородно, а проводник длиной  $l$  прямой, то сила Ампера будет равна

$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}].$$

Сила Лоренца – это сила, действующая на электрический заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , т.е.

$$\vec{F} = q [\vec{v}, \vec{B}].$$

Модуль силы Лоренца

$$F = |q| v B \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Закон Био – Савара – Лапласа: вектор индукции магнитного поля в вакууме, созданного элементом проводника  $d\vec{l}$ , по которому идет ток  $I$ , равен

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\vec{l}, \vec{r}],$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от элемента  $d\vec{l}$  в ту точку, в которой определяется индукция поля;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Модуль вектора  $d\vec{B}$  равен

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \cdot \sin \left( \widehat{d\vec{l}, \vec{r}} \right)}{r^2}.$$

Модуль вектора магнитной индукции в произвольной точке А поля, созданного отрезком прямолинейного проводника с током I, равен

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2),$$

где b – кратчайшее расстояние от точки А до проводника;

$\varphi_1, \varphi_2$  – углы, образованные радиусом-вектором, проведенным в точку А соответственно из начала и конца проводника, с направлением тока.

Магнитная индукция поля, созданного прямолинейным бесконечно длинным проводником с током I, на расстоянии b от него равна

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}.$$

Магнитная индукция в центре дуги окружности длиной L, обтекаемой током I, равна

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot L}{R^2},$$

где R – радиус окружности.

Магнитная индукция в центре окружности ( $L = 2\pi R$ ), обтекаемой током I, равна

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Магнитная индукция B на оси окружности радиуса R, обтекаемой током I, на расстоянии b от центра окружности

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2 \sqrt{(R^2 + b^2)^3}}.$$

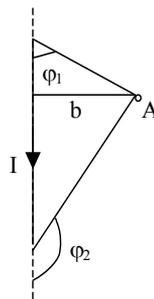


Рис. 1

Циркуляция вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  вдоль замкнутого контура  $L$  равна алгебраической сумме охваченных контуром токов, умноженной на  $\mu_0$ :

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B d\cos(\hat{\vec{B}}, \hat{d\vec{l}}) = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i.$$

Эта формула представляет закон полного тока для магнитного поля в вакууме. При вычислении алгебраической суммы токов ток  $I_i$  считается положительным, если из конца вектора плотности тока  $\vec{j}$  обход контура  $L$  виден происходящим против хода часовой стрелки.

В отличие от электростатического потенциального поля, для которого всегда  $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$ , магнитное поле является вихревым, т.е. в

таком поле циркуляция вектора  $\vec{B}$  вдоль замкнутого контура отлична от нуля.

Потоком вектора  $\vec{B}$  (магнитным потоком) сквозь малую поверхность площади  $dS$  называют величину

$$d\Phi_m = \vec{B} d\vec{S} = B dS \cos(\hat{\vec{B}}, \hat{\vec{n}}) = B_n dS,$$

где  $d\vec{S} = \vec{n} dS$ ;

$\vec{n}$  – единичный вектор внешней нормали к  $dS$ .

Магнитный поток  $\Phi_m$  через произвольную поверхность  $S$  равен

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS.$$

Теорема Остроградского – Гаусса для магнитного поля: магнитный поток сквозь произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен нулю:

$$\Phi_m = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = \oint_S B_n dS = 0.$$

Эта теорема указывает на то, что в природе отсутствуют магнитные заряды.

Магнитная индукция внутри длинного соленоида с током  $I$  (длинным считается соленоид, у которого длина  $l$  намного больше его диаметра  $d$ ) равна

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} = \mu_0 nI,$$

где  $n = \frac{N}{l}$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

Магнитный момент  $\vec{p}_m$  замкнутого плоского контура, обтекаемого током  $I$ , равен

$$\vec{p}_m = I \vec{S},$$

где  $\vec{S} = \vec{n} S$ ;

$S$  – площадь, ограниченная контуром;

$\vec{n}$  – единичный вектор, по направлению совпадающий с положительным направлением нормали к плоскости контура и связанный с направлением тока в контуре правилом правого винта.

Механический вращательный момент  $\vec{M}$ , действующий на замкнутый контур с током в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , равен

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

Работа сил магнитного поля по перемещению замкнутого контура с постоянным током  $I$  равна

$$A = I \Delta\Phi,$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – изменение магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром.

Намагниченность (вектор намагничения)  $\vec{J}$  равна

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_{m,i},$$

где  $N$  – число частиц, содержащихся в малом объеме  $\Delta V$ ;

$\vec{p}_{m,i}$  – магнитный момент  $i$ -й частицы.

Вектор напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля является линейной комбинацией векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{J}$ , т.е.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}.$$

Векторы магнитной индукции  $\vec{B}$  и напряженности  $\vec{H}$  связаны соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды (для вакуума  $\mu = 1$ ).

Циркуляция вектора напряженности  $\vec{H}$  вдоль замкнутого контура  $L$  равна алгебраической сумме токов, охваченных контуром, т.е.

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H d\vec{l} \cos(\vec{H}, \hat{d\vec{l}}) = \sum_i I_i.$$

Магнитная индукция внутри длинного соленоида с магнитным сердечником

$$B = \mu_0 \mu n I,$$

где  $n$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;

$I$  – сила тока, протекающего по нему;

$\mu$  – магнитная проницаемость вещества сердечника.

Индуктивность длинного соленоида объемом  $V = Sl$  с магнитным сердечником

$$L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

Энергия  $W$  магнитного поля контура индуктивностью  $L$ , по которому течет ток  $I$ , равна

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Объемная плотность энергии  $w$  магнитного поля (энергия, отнесенная к единице объема) равна

$$w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}.$$

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея): при всяком изменении магнитного потока сквозь контур в нем возникает электродвижущая сила индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока, т.е.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Если замкнутый контур содержит  $N$  последовательно соединенных витков, то в законе Фарадея магнитный поток  $\Phi$  заменяется потокоцеплением контура  $\Psi = N\Phi$ . Тогда для такого контура

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Знак "минус" в законе электромагнитной индукции соответствует правилу Ленца: при всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную замкнутым контуром, в последнем возникает индукционный ток такого направления, что его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего индукционный ток.

Количество электричества, протекающего по контуру сопротивлением  $R$  при изменении магнитного потока сквозь контур на величину  $\Delta\Phi$ , равно

$$q = -\frac{\Delta\Phi}{R}.$$

Явлением самоиндукции называется возникновение ЭДС индукции в цепи в результате изменения в ней силы тока.

Полный магнитный поток, сцепленный с контуром, равен

$$\Psi_c = LI,$$

где  $L$  – индуктивность контура;

$I$  – сила тока в контуре.

ЭДС самоиндукции для недеформируемого контура, находящегося в неферромагнитной среде ( $L = \text{const}$ ), выражается следующим образом:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}.$$

ЭДС самоиндукции является причиной возникновения в контуре тока самоиндукции.

Сила тока в цепи, обладающей постоянным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$  и содержащей постоянную ЭДС  $\mathcal{E}$ , изменяется:

а) при размыкании цепи по закону

$$I = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}};$$

б) при замыкании цепи по закону

$$I = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right),$$

где  $I_0 = \mathcal{E}/R$ .

В идеальном LC колебательном контуре ( $R = 0$ ) могут возникать незатухающие гармонические колебания:

а) заряда конденсатора

$$q = q_m \cos(\omega t + \alpha);$$

б) напряжения на конденсаторе

$$U = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \alpha) = U_m \cos(\omega_0 t + \alpha);$$

в) тока в контуре

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \alpha) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \alpha\right).$$

Собственная циклическая частота  $\omega_0$  колебаний в контуре – это число полных колебаний за  $2\pi$  секунд:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Период незатухающих колебаний  $T$  – это время, в течение которого совершается одно полное колебание.

$T = 2\pi \sqrt{LC}$  – формула Томпсона;

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

В колебательном контуре в любой момент времени  $t$ :

а) электрическая энергия

$$W_э(t) = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \alpha) = \frac{C U_m^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \alpha);$$

б) магнитная энергия

$$W_м(t) = \frac{1}{2} L I_m^2 \sin^2(\omega t + \alpha) = \frac{1}{2} L q_m^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega t + \alpha);$$

в) полная энергия

$$W = W_э(t) + W_M(t) = \frac{C U_m^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{L I_m^2}{2} .$$

В реальном колебательном контуре ( $R \neq 0$ ), если  $\beta^2 < \omega_0^2$ , могут возникать затухающие колебания. Коэффициент затухания  $\beta = \frac{R}{2L}$ .

Если  $\beta^2 \geq \omega_0^2$ , то вместо колебаний происходит аperiодический разряд конденсатора.

Сопротивление контура, при котором колебательный процесс переходит в аperiодический, называется критическим:

$$R_k = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} .$$

Затухающие колебания:

а) для заряда конденсатора

$$q = q_m e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \alpha);$$

б) для напряжения на конденсаторе

$$U = U_m e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \alpha).$$

Амплитуда заряда  $q_m e^{-\beta t}$  и амплитуда напряжения  $U_m e^{-\beta t}$  убывают с течением времени по экспоненциальному закону.

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T .$$

Здесь  $A(t)$  – амплитуда колебаний в момент времени  $t$ ;

$A(t+T)$  – амплитуда в момент времени  $t+T$ , т.е. через период затухающих колебаний.

Циклическая частота затухающих колебаний

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Период затухающих колебаний

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

Теория Максвелла – последовательная теория единого электромагнитного поля, создаваемого произвольной системой зарядов и токов. В этой теории по заданному распределению зарядов и токов можно найти характеристики создаваемых ими электрического и магнитного полей. В основе теории Максвелла лежат уравнения, которые являются обобщением важнейших законов, описывающих электрические и магнитные явления: теоремы Остроградского – Гаусса, закон полного тока, закон электромагнитной индукции.

Первое уравнение Максвелла в интегральной форме является обобщением закона электромагнитной индукции Фарадея:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \frac{\partial \Phi_m}{\partial t}. \quad (1)$$

Смысл этого уравнения: переменное магнитное поле создает в любой точке пространства вихревое электрическое поле независимо от того, находится в этой точке проводник или нет.

Максвелл обобщил закон полного тока, предположив, что источником магнитного поля являются не только токи, но и переменные электрические поля. Количественной характеристикой магнитного действия переменного электрического поля является ток смещения. Плотность тока смещения равна

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Максвелл предположил, что закон полного тока в магнетостатике будет справедлив и для переменных магнитных полей, если в правую часть закона полного тока добавить ток смещения. Обобщенное таким образом уравнение является вторым уравнением Максвелла для электромагнитного поля:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{\ell} = I + I_{\text{см}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{см}} = \int_S \vec{j}_{\text{см}} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}$ .

Полная система уравнений Максвелла для электромагнитного поля включает в себя еще теорему Остроградского – Гаусса для электрического и магнитного полей:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q \quad (3)$$

и

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (4)$$

Уравнения (1) – (4) представляют собой систему уравнений Максвелла в интегральной форме. Эту систему уравнений дополняют уравнениями, характеризующими электрические и магнитные свойства среды. Эти уравнения имеют вид

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E};$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H},$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные, а  $\varepsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

## Оптика, атомная и ядерная физика

Оптика – раздел физики, занимающийся изучением природы света, закономерностей его испускания, распространения и взаимодействия с веществом.

Экспериментально установлено, что действие света на устройства для его регистрации определяет вектор электрической напряженности  $\vec{E}$  электромагнитного поля световой волны. Его в оптике называют световым вектором.

Скорость света в среде

$$v = \frac{c}{n},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$n$  – показатель преломления среды.

Явление интерференции света состоит в перераспределении световой энергии в пространстве при наложении когерентных волн, т.е. во взаимном усилении этих волн в одних точках пространства и ослаблении – в других.

Необходимым условием интерференции волн является их когерентность. Волны одинаковой частоты, которые приходят в данную точку с разностью фаз, не изменяющейся с течением времени, называются когерентными.

Оптическая длина пути световой волны

$$L = n\ell,$$

где  $\ell$  – геометрическая длина пути световой волны;

$n$  – показатель преломления среды.

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1\ell_1 - n_2\ell_2.$$

Связь между разностью фаз  $\Delta\varphi$  и оптической разностью  $\Delta$  хода световых волн

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{\Delta}{\lambda}\right).$$

Условие усиления света при интерференции

$$\Delta = \pm m\lambda; \quad \Delta\varphi = 2\pi m \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие ослабления света:

$$\Delta = \pm(2m - 1)\frac{\lambda}{2}; \quad \Delta\varphi = (2m - 1)\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Оптическая разность хода световых волн при отражении от пленки, находящейся в воздухе или в вакууме:

$$\Delta = 2d n \cos i_2 \pm \frac{\lambda_0}{2}; \quad \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \pm \frac{\lambda_0}{2},$$

где  $n$  – показатель преломления пленки;

$d$  – ее толщина;

$i_1$  – угол падения;

$i_2$  – угол преломления;

$\lambda_0$  – длина волны света в вакууме.

Радиус светлых  $r_m^{\text{CB}}$  колец Ньютона в отраженном свете

$$r_m^{\text{CB}} = \sqrt{(2m - 1) R \lambda / 2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

радиус темных  $r_m$  колец Ньютона в отраженном свете

$$r_m = \sqrt{m R \lambda} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $m$  – номер кольца;

$R$  – радиус кривизны линзы.

В проходящем свете:

$$\text{светлые кольца} - r_m^{\text{CB}} = \sqrt{m R \lambda} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

$$\text{темные кольца} - r_m = \sqrt{(2m - 1) R \lambda / 2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Дифракцией света называются явления, обуславливающие отклонения от законов геометрической оптики при распространении света в среде с резкими неоднородностями.

Условие минимума при дифракции на одной щели

$$a \sin \varphi = \pm (2m - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $a$  – ширина щели;

$m$  – порядковый номер максимума;

$\varphi$  – угол дифракции, соответствующий  $m$ -му минимуму.

Угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующий максимуму при дифракции света на дифракционной решетке, определяется из условия

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

где  $d$  – период (постоянная) дифракционной решетки:  $d = a + b$ ;

$a$  – ширина щели;

$b$  – ширина непрозрачного промежутка.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = kN,$$

где  $\Delta \lambda$  – наименьшая разность длин волн двух спектральных линий с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta \lambda$ , при которой эти линии видны отдельно в спектре, полученном на дифракционной решетке;

$N$  – полное число щелей решетки.

Пространственной (трехмерной) дифракционной решеткой называется такая оптически неоднородная среда, неоднородности которой периодически повторяются при изменении всех трех пространственных координат. Примером пространственной дифракционной решетки является кристаллическая решетка твердого тела.

Дифракционные максимумы при дифракции рентгеновских лучей на кристаллах удовлетворяют условию Вульфа-Брэггов

$$2d \sin \Theta = m \lambda,$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$  – порядок дифракционного максимума;

$d$  – расстояние между атомными плоскостями кристалла;

$\Theta$  – угол между направлениями параллельного пучка рентгеновских лучей, падающих на кристалл, и атомной плоскостью в кристалле.

Свет, у которого направления колебаний светового вектора  $\vec{E}$  упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным.

Свет называется естественным, если ни одно из направлений колебаний вектора  $\vec{E}$  не является преимущественным.

Свет называют частично поляризованным, если в нем имеется преимущественное направление колебаний вектора  $\vec{E}$ .

Если колебания  $\vec{E}$  происходят параллельно одной плоскости, то такой свет является плоско- (или линейно-) поляризованным.

Если конец вектора  $\vec{E}$  описывает окружность, то такой свет называют поляризованным по кругу.

Если при падении естественного света под углом  $i_B$  на границу раздела двух прозрачных диэлектриков выполняется условие

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21},$$

то отраженный луч будет полностью поляризован (закон Брюстера), степень поляризации преломленного луча достигает наибольшего значения, угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ .

### **Закон Малюса**

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha,$$

где  $I_0$  – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на поляризатор;

$I$  – интенсивность света, проходящего через поляризатор;

$\alpha$  – угол между плоскостью поляризатора и вектором напряженности  $\vec{E}$  в световом луче.

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется тепловым излучением.

Энергетической светимостью называется величина  $R_e$ , численно равная энергии электромагнитных волн всевозможных длин (частот) от 0 до  $\infty$ , излучаемых за единицу времени с единицы площади тела.

## Закон Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана:  $\sigma = 6,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T$  – термодинамическая температура.

Лучеиспускательной способностью или спектральной плотностью энергетической светимости тела называют величину  $\Gamma_{\lambda, T}$ , численно равную энергии теплового излучения тела в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$  за единицу времени с единицы площади тела, отнесенной к величине интервала длин волн  $d\lambda$ .

Величина  $\Gamma_{\lambda, T}$  имеет максимум при некотором значении  $\lambda_m$ .

## Закон смещения Вина

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где  $\lambda_m$  – длина волны, на которую приходится максимум величины  $\Gamma_{\lambda, T}$ ;

$b$  – постоянная закона смещения Вина ( $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м·К).

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda_0},$$

где  $h$  – постоянная Планка:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$\nu$  – частота света;

$\lambda_0$  – длина волны света в вакууме;

$c$  – скорость света в вакууме.

Масса фотона

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda_0 c}.$$

Импульс фотона

$$p = \frac{h}{\lambda_0} = \frac{h\nu}{c}.$$

Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda_0} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

где  $A$  – работа выхода электрона с поверхности вещества;

$v_{\max}$  – максимальная скорость фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_k = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_k = \frac{hc}{A},$$

где  $\nu_k$  – минимальная частота света;

$\lambda_k$  – максимальная длина волны, при которой еще возможен фотоэффект.

Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Протон – положительно заряженная частица, имеющая заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Нейтрон не имеет электрического заряда.

Для обозначения ядер применяется символ  ${}^A_Z X$ , где  $Z$  – зарядовое число ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе Д.М. Менделеева.

Заряд ядра равен  $Z \cdot e$ .

$A = Z + N$  – массовое число;  $N = A - Z$  – количество нейтронов;  $X$  – символ химического элемента.

Радиоактивностью называют превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $N_0$  – количество радиоактивных ядер в образце в начальный момент времени  $t = 0$ ;

$N$  – количество радиоактивных ядер в том же образце в момент времени  $t$ ;

$\lambda$  – постоянная распада:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}};$$

$T_{1/2}$  – период полураспада – промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшится вдвое.

Активность  $A$  радиоактивного образца равна числу распадов ядер, произошедших за единицу времени:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N.$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad A_0 = \lambda N_0,$$

где  $A_0$  – активность образца в начальный момент времени  $t = 0$ ;

$A$  – активность образца во времени  $t$ .

Число атомов, содержащихся в радиоактивном образце массы  $m$ :

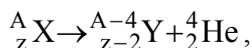
$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где  $M$  – молярная масса изотопа;

$N_A$  – постоянная Авогадро.

Ядра атомов радиоактивного вещества неустойчивы, они самопроизвольно распадаются, испуская либо альфа-, либо бета-частицы, превращаясь при этом в ядра нового элемента. Радиоактивный альфа- и бета-распады многих ядер сопровождаются гамма-излучением. Гамма-лучи являются жестким электромагнитным излучением, энергия которого высвобождается при переходах ядер из возбужденного в основное или в менее возбужденное состояние.

Альфа-распад испытывают только тяжелые ядра с  $A > 200$ :



${}^4_2 \text{He}$  – ядро атома гелия, представляет собой альфа-частицу.

Под бета-распадом понимают три вида ядерных превращений: электронный ( $\beta^-$ ) распад, позитронный ( $\beta^+$ ) распад и электронный захват.

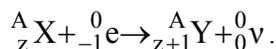
$\beta^-$ -распад (испускается электрон  ${}_{-1}^0\text{e}$ )



$\beta^+$ -распад (испускается позитрон  ${}_{+1}^0\text{e}$ )



электронный захват



${}^0_0\nu$  и  ${}^0_0\tilde{\nu}$  – нейтрино и антинейтрино, выделяющиеся в реакциях  $\beta$ -распада ядер.

Энергия связи ядра равна работе, которую нужно затратить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны:

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m,$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$\Delta m$  – дефект массы.

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}},$$

$m_p$  и  $m_n$  – массы протона и нейтрона;

$m_{\text{я}}$  – масса ядра.

В справочниках приводятся не массы ядер, а массы атомов, тогда формула для дефекта массы ядер может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{A}},$$

где  $m_{\text{H}}$  – масса атома водорода;

$m_{\text{A}}$  – масса соответствующего элемента.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = 931,5 \Delta m ,$$

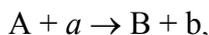
где дефект массы  $\Delta m$  берут в а.е.м.

Удельная энергия связи (энергия связи на один нуклон)

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} .$$

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции символически записываются в виде



где  $A$  и  $B$  – исходное и конечное ядра;

$a$  и  $b$  – исходная и конечная частицы в реакции.

Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2 [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] ,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы;

$m_3$  и  $m_4$  – массы покоя ядер продуктов реакции.

Если  $Q < 0$  , то энергия поглощается, если  $Q > 0$ , то реакция идет с выделением энергии.

### Примеры решения задач для контрольной работы №1

**Пример 1.** Уравнение движения материальной точки имеет вид  $x = A + Bt + Ct^4$  (м), где  $A = 1$  м,  $B = 2$  м/с,  $C = -0,5$  м/с<sup>4</sup>. Найти координату, скорость и ускорение точки в момент времени  $t_1 = 3$  с.

**Решение.** Координату  $x_1$  точки находим, подставляя численные значения в уравнение движения:

$$x_1 = (1 + 2 \cdot 3 - 0,5 \cdot 81) \text{ м} = 33,5 \text{ м} .$$

Мгновенная скорость точки

$$v_x = \frac{dx}{dt} = B + 4Ct^3.$$

Мгновенное ускорение точки

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = 12Ct^2.$$

В момент времени  $t_1 = 3$  с

$$v_x = (2 - 4 \cdot 0,5 \cdot 27) \text{ м/с} = -52 \text{ м/с}.$$

$$a_x = -12 \cdot 0,5 \cdot 9 \text{ м/с}^2 = -54 \text{ м/с}^2.$$

Следовательно, точка движется в отрицательном направлении оси OX равнозамедленно.

**Ответ:**  $x_1 = 33,5$  м,  $v_x = -52$  м/с,  $a_x = -54$  м/с<sup>2</sup>.

**Пример 2.** Из установленного на железнодорожной платформе орудия производится выстрел вдоль рельсов. Масса платформы и орудия  $1,5 \cdot 10^4$  кг, масса снаряда 100 кг. Скорость снаряда относительно орудия 500 м/с. Определить скорость платформы в первый момент после выстрела, если: 1) платформа стояла неподвижно; 2) платформа двигалась со скоростью 18 км/ч и выстрел был произведен в направлении ее движения; 3) платформа двигалась со скоростью 18 км/ч и выстрел был произведен в направлении, противоположном ее движению.

**Решение.** В каждом из трех случаев систему тел (платформа с орудием и снаряд) можно рассматривать как замкнутую систему. Тогда, согласно закону сохранения импульса, запишем

$$(m_1 + m_2) \vec{v}_1 = m_2 \vec{v}' + m_1 \vec{v}_x, \quad (5)$$

где  $\vec{v}_1$  – скорость платформы до выстрела;

$\vec{v}_x$  – скорость платформы после выстрела;

$\vec{v}'$  – скорость снаряда относительно Земли.

Записанное векторное уравнение дополним еще одним, выражающим закон сложения скоростей:

$$\vec{v}' = \vec{v}_0 + \vec{v}_x, \quad (6)$$

где  $\vec{v}_0$  – скорость снаряда относительно орудия (платформы).

Для проведения вычислений необходимо выражения (5) и (6) записать в скалярной форме, для чего следует выбрать направление оси проекции. Совместим положительное направление оси  $x$  с направлением движения заряда (см. рис. 2).

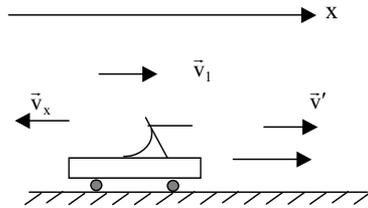


Рис. 2

1. Платформа неподвижна ( $\vec{v}_1 = 0$ ). Пусть платформа после выстрела начнет двигаться в сторону, противоположную движению снаряда. Тогда на основании (5) и (6) получим

$$m_2 v' - m_1 v_x = 0;$$

$$v' = v_0 - v_x,$$

откуда

$$v_x = \frac{m_2 v_0}{m_1 + m_2} \approx 3,33 \text{ м/с.}$$

Положительный знак  $v_x$  свидетельствует о том, что направление вектора  $\vec{v}_x$  нами было выбрано правильно.

2. Выстрел произведен в направлении движения платформы ( $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}'$  совпадают по направлению). Вектор искомой скорости направим в противоположную сторону (платформа изменила направление своего движения). Тогда

$$(m_1 + m_2)v_1 = m_2 v' - m_1 v_x, \quad v' = v_0 - v_x.$$

Искомая скорость

$$v_x = \frac{m_2 v_0 - (m_1 + m_2) v_1}{m_1 + m_2} = -1,69 \text{ м/с.}$$

Знак «минус» указывает на то, что направление движения платформы после выстрела нами выбрано ошибочно. Платформа не изменит после выстрела направления своего движения.

3. Если выстрел был произведен в сторону, противоположную движению платформы ( $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}'$  противоположны), то направление движения ее изменится ( $\vec{v}_x$  и  $\vec{v}_1$  совпадут по направлению) и уравнения (5), (6) запишутся в проекциях следующим образом:

$$-(m_1 + m_2)v_1 = m_2 v' - m_1 v_x, \quad v' = v_0 - v_x.$$

Следовательно:

$$v_x = \frac{(m_1 + m_2)v_1 + m_2 v_0}{m_1 + m_2} \approx 8,37 \text{ м/с.}$$

**Ответ:** 1)  $v_x \approx 3,33 \text{ м/с}$ ; 2)  $v_x = -1,69 \text{ м/с}$ ; 3)  $v_x \approx 8,37 \text{ м/с}$ .

**Пример 3.** Через блок в виде сплошного диска, имеющего массу  $m = 80 \text{ г}$ , перекинута тонкая гибкая нить, к концам которой подвешены грузы с массами  $m_1 = 100 \text{ г}$  и  $m_2 = 200 \text{ г}$ . Определить ускорение, с которым будут двигаться грузы, если их предоставить самим себе. Трением и массой нити пренебречь.

**Решение.** Силы, действующие на каждый груз и на блок, изображены на рис. 3. Направим ось  $X$  вертикально вниз и напишем для каждого груза

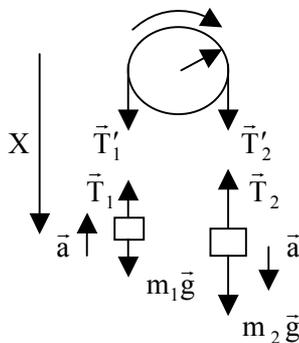


Рис. 3

уравнение движения (второй закон Ньютона) в проекциях на эту ось. Для первого груза

$$m_1 g - T_1 = -m_1 a ; \quad (7)$$

для второго груза

$$m_2 g - T_2 = m_2 a . \quad (8)$$

Под действием моментов сил  $T'_1$  и  $T'_2$  относительно оси  $Z$ , перпендикулярной плоскости чертежа и направленной от нас, блок приобретает угловое ускорение  $\varepsilon$ . Согласно основному уравнению динамики вращательного движения относительно неподвижной оси

$$T'_2 r - T'_1 r = I_z \varepsilon , \quad (9)$$

где  $\varepsilon = \frac{a}{r}$ ;  $I_z = \frac{1}{2} m r^2$  – момент инерции блока относительно оси  $Z$ .

Согласно третьему закону Ньютона, с учетом невесомости нити  $T'_1 = T_1$ ;  $T'_2 = T_2$ . Воспользовавшись этим, подставим в уравнение (9) вместо  $T'_1$  и  $T'_2$  выражения  $T_1$  и  $T_2$ , предварительно получив их из уравнений (7) и (8).

$$(m_2 g - m_2 a) r - (m_1 g + m_1 a) r = \frac{m r^2 a}{2r} .$$

Тогда

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2 + m/2} g . \quad (10)$$

После подстановки числовых значений в формулу (10) получим

$$a = \frac{(200 - 100)}{(200 + 100 + 80/2)} \cdot 9,8 = 2,88 \text{ м/с}^2 .$$

**Ответ:**  $a = 2,88 \text{ м/с}^2$  .

**Пример 4.** Тело массой  $m_1 = 1$  кг ударяется о неподвижное тело массой  $m_2 = 4$  кг. Считая удар центральным и абсолютно упругим, найти, какую часть энергии первое тело передает второму при ударе.

**Решение.** Поскольку удар абсолютно упругий, то для него выполняется закон сохранения энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2},$$

где  $v_1, v_2, u_1, u_2$  – скорости тел соответственно до и после удара. Кинетическая энергия второго тела до удара была равна нулю. После удара изменение энергии второго тела  $\Delta W_k = W_{k2}$ , где  $W_{k2}$  – кинетическая энергия второго тела после удара. По определению

$$W_{k2} = \frac{m_2 u_2^2}{2}; \quad W_{k1} = \frac{m_1 v_1^2}{2}.$$

По закону сохранения импульса

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2.$$

Так как  $v_2 = 0$ , то

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (11)$$

а закон сохранения импульса в проекции на ось, параллельную скорости движения первого тела, запишем так:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2. \quad (12)$$

Решая систему уравнений (11), (12), найдем

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Кинетическая энергия второго тела после удара

$$W_{к2} = \frac{m_2 u_2^2}{2} = \frac{2m_2 m_1^2 v_1^2}{(m_1 + m_2)^2}.$$

Определим часть энергии, которую передаст первое тело при ударе:

$$\frac{W_{к2}}{W_{к1}} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2};$$

$$\frac{W_{к2}}{W_{к1}} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 4}{(1 + 4)^2} = 0,64.$$

**Ответ:**  $\frac{W_{к2}}{W_{к1}} = 0,64$ .

**Пример 5.** Диск массой  $m = 2$  кг, радиусом  $R = 10$  см вращается вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр с частотой  $n = 600$  мин<sup>-1</sup>. Через  $\Delta t = 20$  с под действием тормозящего момента диск остановился. Считая массу диска равномерно распределенной, найти тормозящий момент  $M$  и число оборотов  $N$ , которое сделает диск до полной остановки.

**Решение.** Для определения тормозящего момента  $M$  сил, действующих на тело, нужно использовать основное уравнение динамики вращательного движения

$$I \Delta\omega = M \Delta t, \quad (13)$$

где  $I$  – момент инерции диска относительно оси, проходящей через его центр масс;

$\Delta\omega$  – изменение угловой скорости за промежуток времени  $\Delta t$ .

По условию задачи  $\Delta\omega = -\omega_0$ , где  $\omega_0$  – начальная угловая скорость, конечная угловая скорость  $\omega = 0$ . Выразим начальную угловую скорость через частоту вращения диска. Тогда

$$\omega_0 = 2\pi n \quad \text{и} \quad \Delta\omega = -2\pi n.$$

Момент инерции диска

$$I = \frac{mR^2}{2},$$

где  $m$  – масса диска;

$R$  – его радиус.

Тогда формула (13) примет вид

$$M = \frac{-\pi n m R^2}{\Delta t},$$

$$M = \frac{-3,14 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 0,1^2}{20} = -3,1 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Знак "минус" у  $M$  указывает на то, что на диск действует тормозящая сила.

Угол поворота за время вращения диска до остановки может быть определен по формуле для равнозамедленного вращения

$$\varphi = \omega_0 \Delta t - \frac{\varepsilon (\Delta t)^2}{2}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon$  – угловое ускорение.

По условию задачи  $\omega = \omega_0 - \varepsilon \Delta t$ ;  $\omega = 0$ ;  $\varepsilon \Delta t = \omega_0$ . Тогда из формулы (14)

$$\varphi = \omega_0 \Delta t - \frac{\omega_0 \Delta t}{2} = \frac{\omega_0 \Delta t}{2}.$$

Так как

$$\varphi = 2\pi N, \quad \omega_0 = 2\pi n,$$

то число полных оборотов

$$N = \frac{n \Delta t}{2};$$

$$N = \frac{10 \cdot 20}{2} = 100.$$

**Ответ:**  $M = -3,1 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $N = 100$ .

**Пример 6.** Найти силу, приложенную касательно к ободу диска, если через 5 секунд кинетическая энергия диска массой 5 кг под действием этой силы увеличилась до 1,92 кДж.

**Решение.** Основное уравнение динамики вращательного движения

$$M = \varepsilon I. \quad (15)$$

Момент силы

$$M = FR, \quad (16)$$

где  $R$  – радиус диска.

Угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t}, \quad (17)$$

так как начальная угловая скорость  $\omega_0 = 0$ .

Момент инерции диска

$$I = \frac{1}{2} mR^2. \quad (18)$$

Из (15) – (18) следует, что

$$F = \frac{\omega}{2t} mR^2. \quad (19)$$

Угловую скорость  $\omega$  найдем из формулы для кинетической энергии вращательного движения

$$W_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2W_k}{I}} = \sqrt{\frac{4W_k}{mR^2}} = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{W_k}{m}}. \quad (20)$$

Подставив (20) в (19), получим

$$F = \frac{\sqrt{W_k m}}{t};$$

$$F = \frac{\sqrt{1920 \cdot 5}}{5} = 19,6 \text{ Н}.$$

**Ответ:**  $F = 19,6 \text{ Н}$ .

**Пример 7.** Вычислить, какое число молекул кислорода содержится в сосуде объемом  $V = 1 \text{ л}$  при нормальных условиях. Найти массу  $m$  кислорода в сосуде, а также массу  $m_0$  одной его молекулы. Чему равна внутренняя энергия  $U$  этого газа?

**Решение.** Молярная масса кислорода  $M = 0,032 \text{ кг/моль}$ , поэтому масса одной молекулы кислорода

$$m_0 = \frac{M}{N_A},$$

где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – число Авогадро. Следовательно,

$$m_0 = \frac{0,032}{6,02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 5,32 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Уравнение состояния идеального газа имеет вид

$$p = nkT. \quad (21)$$

При нормальных условиях давление  $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , температура  $T = 273,15 \text{ К}$ ;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана. Поскольку концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V}, \quad (22)$$

где  $N$  – число молекул в объеме  $V = 10^{-3} \text{ м}^3$ , то из (21) и (22) следует, что

$$N = \frac{pV}{kT}.$$

Следовательно,

$$N = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273,15} \cong 2,7 \cdot 10^{22} \text{ молекул.}$$

Масса газа равна массе всех его молекул, т.е.

$$m = Nm_0,$$

поэтому

$$m = 2,7 \cdot 5,32 \cdot 10^{-4} \text{ кг} = 1,44 \text{ г}.$$

Внутренняя энергия заданной массы идеального газа равна

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT,$$

где  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$  – молярная газовая постоянная;

$i = 5$  – число степеней свободы жесткой двухатомной молекулы кислорода.

В результате вычислений получаем

$$U = \frac{5 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 273,15}{2 \cdot 0,032} \text{ Дж} = 255 \text{ Дж}.$$

**Ответ:**  $N = 2,7 \cdot 10^{22}$ ;  $m = 1,44 \text{ г}$ ;  $m_0 = 5,32 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ ;  $U = 255 \text{ Дж}$ .

**Пример 8.** Плотность кислорода в сосуде  $\rho = 0,06 \text{ кг/м}^3$ , а сред-  
неквадратичная скорость его молекул  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 500 \text{ м/с}$ . Найти дав-  
ление  $p$ , которое оказывает газ на стенки сосуда, а также темпера-  
туру  $T$  газа и концентрацию  $n$  его молекул.

**Решение.** Согласно основному уравнению молекулярно-кинети-  
ческой теории газов

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2, \quad (23)$$

где  $m_0$  – масса молекулы кислорода.

Учтем, что  $\rho = n m_0$ . С учетом этого соотношения выражение (23)  
принимает вид

$$p = \frac{1}{3} \rho \langle v_{\text{кв}} \rangle^2,$$

откуда получаем следующий результат:

$$p = \frac{1}{3} 0,06 \cdot 500^2 \text{ Па} = 5 \text{ кПа}.$$

Для среднеквадратичной скорости справедливо следующее соот-  
ношение:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (24)$$

где  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$  – молярная газовая постоянная;

$M = 0,032 \text{ кг/моль}$  – молярная масса молекулярного кислорода.

Возведем равенство (24) в квадрат и получим из него оконча-  
тельное выражение для температуры:

$$T = \frac{M \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{3R}.$$

В результате вычислений получаем

$$T = \frac{0,032 \cdot 25 \cdot 10^4}{3 \cdot 8,31} \text{ К} = 321 \text{ К}.$$

Давление газа связано с концентрацией его молекул следующим соотношением:

$$p = n k T,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

С учетом этого соотношения

$$n = \frac{p}{kT}.$$

Вычисление приводит к итоговому результату:

$$n = \frac{5 \cdot 10^3}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 321} = 1,13 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

**Ответ:**  $p = 5$  кПа;  $T = 321$  К;  $n = 1,13 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

**Пример 9.** В одном баллоне объемом  $V_1 = 15$  л находится газ под давлением  $p_1 = 0,2$  МПа, а в другом – тот же газ под давлением  $p_2 = 1$  МПа. Баллоны, температура  $T$  которых одинакова, соединены тонкой короткой трубкой с краном. Если открыть кран, то в обоих баллонах устанавливается давление  $p = 0,4$  МПа. Каков объем  $V_2$  второго баллона?

**Решение.** Обозначим  $v_1$  – количество газа в первом баллоне, а  $v_2$  – количество газа во втором баллоне до открытия крана. Из уравнения состояния идеального газа

$$pV = \nu RT \tag{25}$$

следует, что значения  $v_1$  и  $v_2$  равны:

$$v_1 = \frac{p_1 V_1}{RT}, \quad v_2 = \frac{p_2 V_2}{RT}. \quad (26)$$

После открытия крана общее количество вещества  $v$  будет по-прежнему равным

$$v = v_1 + v_2 = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{RT}, \quad (27)$$

а полный объем

$$V = V_1 + V_2. \quad (28)$$

При этом парциальные давления указанных порций газа станут согласно (25) равными

$$p'_1 = \frac{v_1 RT}{V}, \quad p'_2 = \frac{v_2 RT}{V}. \quad (29)$$

Поскольку температура  $T$  остается неизменной, то для решения задачи мы можем воспользоваться законом Дальтона, согласно которому в соответствии с (26) – (29)

$$p = p'_1 + p'_2 = \frac{(v_1 + v_2) RT}{V} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}. \quad (30)$$

Заменив в равенстве (30) согласно с (28)  $V_1 = V - V_2$ , получаем равенство, из которого выражаем искомую величину, а именно

$$V_2 = V_1 \frac{p - p_1}{p_2 - p}.$$

После численных расчетов получаем

$$V_2 = 0,015 \cdot \frac{4 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5}{10^6 - 4 \cdot 10^5} \text{ м}^3 = 0,005 \text{ м}^3 = 5 \text{ л}.$$

**Ответ:**  $V_2 = 5 \text{ л}$ .

**Пример 10.** Кислород массой  $m = 10$  г находится под давлением  $p_1 = 3 \cdot 10^5$  Па при температуре  $T_1 = 283$  К. После нагревания при постоянном давлении газ занял объем  $V_2 = 0,01$  м<sup>3</sup>. Найти: 1) количество тепла  $Q$ , полученного газом; 2) энергию теплового движения молекул газа до и после нагревания; 3) работу газа в процессе нагревания. Нарисовать график процесса.

**Решение.** 1) Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона для конечного состояния газа справедливо соотношение

$$p_1 V_2 = \frac{m}{M} R T_2,$$

где  $M = 0,032$  кг/моль – молярная масса молекулярного кислорода, а  $T_2$  – температура газа в конечном состоянии. Отсюда

$$T_2 = \frac{p_1 V_2 M}{m R}. \quad (31)$$

Поскольку молекулярный кислород является двухатомным газом, то для него число степеней свободы  $i = 5$ , поэтому его молярная теплоемкость при постоянном давлении равна

$$C_p = \frac{i + 2}{2} R = \frac{7}{2} R, \quad (32)$$

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

Тогда количество теплоты  $Q$ , полученное газом в этом процессе, будет задаваться соотношением

$$Q = C_p \frac{m}{M} (T_2 - T_1).$$

С учетом выражений (31) и (32) последнее равенство можно привести к виду

$$Q = \frac{7}{2M} (M p_1 V_2 - m R T_1),$$

откуда получаем

$$Q = \frac{7}{2 \cdot 0,032} (0,032 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 0,01 \cdot 8,31 \cdot 283) \text{ Дж} = 7,93 \text{ кДж}.$$

2). Энергия теплового движения молекул газа (внутренняя энергия газа) до и после нагревания соответственно равны

$$U_1 = \frac{i}{2} R \frac{m}{M} T_1, \quad U_2 = \frac{i}{2} R \frac{m}{M} T_2 = \frac{i}{2} p_1 V_2.$$

В результате вычислений получаем

$$U_1 = \frac{5 \cdot 0,01}{2 \cdot 0,032} 8,31 \cdot 283 \text{ Дж} = 1,84 \text{ кДж},$$

$$U_2 = \frac{5}{2} 3 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \text{ Дж} = 7,5 \text{ кДж}.$$

3). Согласно первому началу термодинамики работа газа  $A = Q - \Delta Q = Q - (U_2 - U_1)$ . Подставляя численные значения, получаем

$$A = 7,93 \cdot 10^5 - (7,5 - 1,84) \cdot 10^5 = 2,27 \text{ кДж}.$$

График процесса изображен на рис. 4.

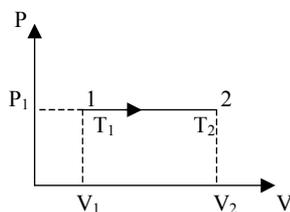


Рис. 4

**Ответ:** 1)  $Q = 7,93 \text{ кДж}$ ; 2)  $U_1 = 1,84 \text{ кДж}$ ;  $U_2 = 7,5 \text{ кДж}$ ; 3)  $A = 2,27 \text{ кДж}$ .

**Пример 11.** Тепловая машина работает по обратному циклу Карно. Температура теплоотдатчика  $T_1 = 500$  К. Определить термический КПД  $\eta$  цикла и температуру  $T_2$  теплоприемника тепловой машины, если за счет каждого килоджоула теплоты, полученной от теплоотдатчика, машина совершает работу  $A = 350$  Дж.

**Решение.** Термический КПД тепловой машины показывает, какая доля теплоты, полученной от теплоотдатчика, превращается в механическую работу. Термический КПД выражается формулой

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

где  $Q_1$  – теплота, полученная от теплоотдатчика;

$A$  – работа, совершенная рабочим телом тепловой машины.

Зная КПД цикла, можно по формуле

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

определить температуру охладителя  $T_2$ :

$$T_2 = T_1(1 - \eta).$$

Произведем вычисления:

$$\eta = \frac{350 \text{ Дж}}{1000 \text{ Дж}} = 0,35; \quad T_2 = 500 \cdot (1 - 0,35) \text{ К} = 325 \text{ К}.$$

**Ответ:**  $\eta = 0,35$ ;  $T_2 = 325$  К.

**Пример 12.** Найти модуль силы  $\vec{F}$ , действующей в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 6,0$  на точечный заряд  $Q = 6,72 \cdot 10^{-10}$  Кл, если этот заряд помещен: 1) в поле такого же точечного заряда на расстоянии  $d = 0,02$  м от него; 2) в поле равномерно заряженной бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда  $\sigma = 2,0 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>; 3) на расстоянии  $d$  от равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда  $\tau = 2,0 \cdot 10^{-7}$  Кл/м; 4) на

расстоянии  $d$  от поверхности заряженного проводящего шара радиусом  $R = d$  и поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ .

**Решение.** Сила  $\vec{F}$ , действующая на точечный заряд  $q$  в электрическом поле, напряженность которого в заданной точке поля равна  $\vec{E}$ , согласно определению равна

$$\vec{F} = q \vec{E},$$

поэтому в данной задаче модуль этой силы равен

$$F = qE. \quad (33)$$

1). Модуль напряженности  $E_1$  электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $d$  от него в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , равен

$$E_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 d^2}.$$

Тогда согласно (33) модуль силы, действующей на такой же заряд в указанной точке поля, равен

$$F_1 = qE_1 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 d^2}.$$

2). Модуль напряженности  $E_2$  однородного электрического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$  в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  равен

$$E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

Тогда согласно (33) модуль силы  $F_2$ , действующей на заряд  $Q$  в любой точке этого поля, равен

$$F_2 = qE_2 = \frac{q\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

3). Модуль напряженности  $E_3$  электрического поля бесконечной равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда  $\tau$  на расстоянии  $d$  от нити в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  равен

$$E_3 = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 d}.$$

В соответствии с равенством (33) модуль силы  $F_3$ , действующей на заряд  $q$ , помещенный в указанную точку поля нити, равен

$$F_3 = qE_3 = \frac{q\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 d}.$$

4). Модуль напряженности  $E_4$  электрического поля заряженного шара на расстоянии  $r$  от его центра ( $r \geq R$ , где  $R$  – радиус шара), на котором находится заряд  $q_0$ , в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  равен

$$E_4 = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}. \quad (34)$$

По условию задачи,  $r = R + d$ . Согласно определению  $\sigma = q_0/S$ , где  $S = \pi R^2$  – площадь поверхности шара. Отсюда следует, что

$$q_0 = \sigma S = 4\pi R^2 \sigma. \quad (35)$$

На основании формул (33) – (35) получаем значение модуля силы, действующей на заряд  $q$  в указанной точке поля:

$$F_4 = qE_4 = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2} = \frac{4\pi R^2 \sigma q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 (R + d)^2} = \frac{R^2 \sigma q}{\varepsilon\varepsilon_0 (R + d)^2} = \frac{\sigma q}{4\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Учитывая исходные данные и значение электрической постоянной  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, в результате вычислений получаем следующие значения:

$$F_1 = \frac{(0,672 \cdot 10^{-9})^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} \text{ Н} = 1,69 \text{ мкН};$$

$$F_2 = \frac{0,672 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \text{ Н} = 127 \text{ мкН};$$

$$F_3 = \frac{0,672 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,02} \text{ Н} = 20,2 \text{ мкН};$$

$$F_4 = \frac{0,672 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \text{ Н} = 63,3 \text{ мкН}.$$

**Ответ:** 1)  $F_1 = 1,69 \text{ мкН}$ ; 2)  $F_2 = 127 \text{ мкН}$ ; 3)  $F_3 = 20,2 \text{ мкН}$ ;  
4)  $F_4 = 63,3 \text{ мкН}$ .

**Пример 13.** В схеме, изображенной на рис. 5, сопротивление  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 6 \text{ Ом}$ , ЭДС = 10 В, его внутреннее сопротивление  $r = 0,4 \text{ Ом}$ . Определите сопротивление внешней цепи  $R$ , общий ток в электрической цепи, токи  $I_1$  и  $I_2$  через сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , показания вольтметра.

**Решение.** Последовательно сопротивлению  $R_1$  включены два параллельных сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ . Сопротивление внешней цепи

$$R = R_1 + R_{2,3}. \quad (36)$$

Общее сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$  равно

$$R_{2,3} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}. \quad (37)$$

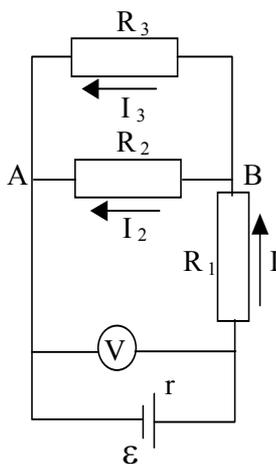


Рис. 5

Подставив (37) в (36), получаем

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}; \quad R = 2 + \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 4,4 \text{ Ом}.$$

Общий ток найдем, воспользовавшись законом Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}; \quad I = \frac{10}{4,4 + 0,6} = 2 \text{ А}.$$

В узле В ток I разветвляется на  $I_2$  и  $I_3$ :

$$I = I_2 + I_3. \quad (38)$$

Напряжения на параллельно включенных сопротивлениях  $R_2$  и  $R_3$  равны

$$I_2 R_2 = I_3 R_3. \quad (39)$$

Решив совместно уравнения (38) и (39) найдем

$$I_3 = \frac{I R_2}{R_2 + R_3}, \quad I_2 = I - I_3,$$
$$I_3 = \frac{2 \cdot 4}{4 + 6} = 0,8 \text{ А}, \quad I_2 = 1,2 \text{ А}.$$

Вольтметр показывает напряжение на внешнем участке цепи. Оно может быть найдено двумя способами:

1) как разность ЭДС источника и напряжения на сопротивлении источника:

$$U_B = \varepsilon - I r; \quad U_B = 10 - 2 \cdot 0,6 = 8,8 \text{ В}.$$

2) показание вольтметра равно напряжению на внешней цепи:

$$U_B = I R; \quad U_B = 2 \cdot 4,4 = 8,8 \text{ В}.$$

**Ответ:**  $I = 2 \text{ А}; R = 4,4 \text{ Ом}; I_2 = 1,2 \text{ А}; I_3 = 0,8 \text{ А}; U_B = 8,8 \text{ В}.$

**Пример 14.** Сила тока в проводнике сопротивлением  $R = 20$  Ом нарастает в течение времени  $\Delta t = 2$  с по линейному закону от  $I_0 = 0$  до  $I = 6$  А (см. рис. 6). Определить теплоту  $Q_1$ , выделившуюся в этом проводнике за первую секунду, и  $Q_2$  – за вторую, а также найти отношение  $Q_2/Q_1$ .

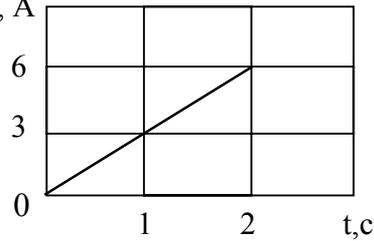


Рис. 6

**Решение.** Закон Джоуля – Ленца в виде  $Q = I^2 R t$  справедлив для постоянного тока ( $I = \text{const}$ ). Если же сила тока в проводнике изменяется, то указанный закон справедлив для бесконечно малого интервала времени и записывается в виде

$$dQ = I^2 R dt. \quad (40)$$

Здесь сила тока  $I$  является некоторой функцией времени  $I = f(t)$ . В данном случае

$$I = k \cdot t, \quad (41)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость изменения силы тока

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

С учетом (41) формула (40) примет вид

$$dQ = k^2 R t^2 dt. \quad (42)$$

Для определения теплоты, выделившейся за первую секунду, выражение (42) надо проинтегрировать в пределах от 0 до  $t_1$ :

$$Q_1 = k^2 R \int_0^{t_1} t^2 dt = \frac{1}{3} k^2 R t_1^3; \quad Q_1 = \frac{1}{3} 3^2 \cdot 20 \cdot 1^3 = 60 \text{ Дж}.$$

Для определения теплоты, выделившейся за вторую секунду, выражение (42) проинтегрируем в пределах от  $t_1$  до  $t_2$  секунд:

$$Q_2 = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3);$$

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

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{420}{60} = 7 \text{ раз},$$

т.е. за вторую секунду выделилось теплоты в 7 раз больше, чем за первую.

**Ответ:**  $Q_1 = 60 \text{ Дж}$ ;  $Q_2 = 420 \text{ Дж}$ ;  $Q_2/Q_1 = 7$ .

## Контрольная работа №1

### Варианты контрольной работы

| Варианты | Номера задач |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1        | 101          | 111 | 121 | 131 | 141 | 151 | 161 | 171 | 181 |
| 2        | 102          | 112 | 122 | 132 | 142 | 152 | 162 | 172 | 182 |
| 3        | 103          | 113 | 123 | 133 | 143 | 153 | 163 | 173 | 183 |
| 4        | 104          | 114 | 124 | 134 | 144 | 154 | 164 | 174 | 184 |
| 5        | 105          | 115 | 125 | 135 | 145 | 155 | 165 | 175 | 185 |
| 6        | 106          | 116 | 126 | 136 | 146 | 156 | 166 | 176 | 186 |
| 7        | 107          | 117 | 127 | 137 | 147 | 157 | 167 | 177 | 187 |
| 8        | 108          | 118 | 128 | 138 | 148 | 158 | 168 | 178 | 188 |
| 9        | 109          | 119 | 129 | 139 | 149 | 159 | 169 | 179 | 189 |
| 0        | 110          | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 |

101. Материальная точка движется прямолинейно. Уравнение движения имеет вид  $S = 2t + 0,04t^3$  (расстояние – в метрах, время – в секундах). Найти скорость и ускорение точки в моменты времени  $t_1 = 0$  и  $t_2 = 5$  с. Каковы средние значения скорости и ускорения за первые 5 с движения?

102. Материальная точка движется по окружности радиуса 80 см согласно уравнению  $S = 10t - 0,1t^3$  (расстояние – в метрах, время – в секундах). Найти скорость, тангенциальное, нормальное и полное ускорения в момент времени  $t = 2$  с.

103. Точка движется по прямой согласно уравнению  $x = 6t + \frac{t^3}{8}$ .

Определите среднюю скорость движения точки в интервале времени от  $t_1 = 2$  с до  $t_2 = 6$  с, скорость и ускорение точки в момент времени  $t_2 = 6$  с.

104. Движения двух материальных точек выражаются уравнениями  $x_1 = 20 + 2t - 4t^2$  и  $x_2 = 2 + 2t + 0,5t^2$ . В какой момент времени скорости этих материальных точек будут одинаковыми? Чему равны скорости и ускорения точек в этот момент?

105. Зависимость пройденного телом пути  $S$  от времени  $t$  задается уравнением  $S = At - Bt^2 + Ct^3$ , где  $A = 2$  м/с,  $B = 3$  м/с<sup>2</sup>,  $C = 4$  м/с<sup>3</sup>. Найти: 1) зависимость скорости  $v$  и ускорения  $a$  от времени  $t$ ; 2) расстояние, пройденное телом, скорость и ускорение тела через 2 с после начала движения.

106. Зависимость пройденного телом пути  $S$  от времени  $t$  задается уравнением  $S = A - Bt + Ct^2$ , где  $A = 6$  м,  $B = 3$  м/с,  $C = 2$  м/с<sup>2</sup>. Найти среднюю скорость и среднее ускорение тела в интервале времени от 1 до 4 с, скорость и ускорение в момент времени  $t = 4$  с.

107. Зависимость пройденного телом пути  $S$  от времени  $t$  задается уравнением  $S = A + Bt + Ct^2$ , где  $A = 3$  м,  $B = 2$  м/с и  $C = 1$  м/с<sup>2</sup>. Найти среднюю скорость и среднее ускорение тела за первую, вторую и третью секунды его движения.

108. Зависимость пройденного телом пути  $S$  от времени  $t$  задается уравнением  $S = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ , где  $C = 0,14$  м/с<sup>2</sup> и  $D = 0,01$  м/с<sup>3</sup>. Через сколько времени после начала движения ускорение тела бу-

дет равно  $1 \text{ м/с}^2$ ? Чему равно среднее ускорение тела за этот промежуток времени?

109. Тело движется прямолинейно под действием постоянной силы  $15 \text{ Н}$ . Зависимость координаты от времени имеет вид  $x = 10 - 5t + 2t^2$ . Найти массу тела.

110. Тело массой  $0,5 \text{ кг}$  движется прямолинейно, причем зависимость пройденного телом пути  $S$  от времени  $t$  задается уравнением  $S = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$ , где  $C = 5 \text{ м/с}^2$  и  $D = 1 \text{ м/с}^3$ . Найти силу, действующую на тело в конце первой секунды движения.

111. По небольшому куску мягкого железа, лежащему на наковальне массой  $m_1 = 300 \text{ кг}$ , ударяет молот массой  $m_2 = 8 \text{ кг}$ . Определить КПД  $\eta$  удара, если удар неупругий. Полезной считать энергию, затраченную на деформацию куска железа.

112. Шар массой  $m_1 = 3 \text{ кг}$  движется со скоростью  $v_1 = 2 \text{ м/с}$  и сталкивается с покоящимся шаром массой  $m_2 = 5 \text{ кг}$ . Какая работа будет совершена при деформации шаров? Удар считать абсолютно неупругим, прямым, центральным.

113. Молот массой  $m = 5 \text{ кг}$ , двигаясь со скоростью  $v = 4 \text{ м/с}$ , ударяет по железному изделию, лежащему на наковальне. Масса наковальни с изделием  $M = 95 \text{ кг}$ . Считая удар абсолютно неупругим, определить энергию, расходуемую на ковку (деформацию) изделия. Чему равен КПД процессаковки при данных условиях?

114. Из орудия, не имеющего противооткатного устройства, производилась стрельба в горизонтальном направлении. Когда орудие было неподвижно закреплено, снаряд вылетел со скоростью  $v_1 = 600 \text{ м/с}$ , а когда орудию дали возможность свободно откатываться назад, снаряд вылетел со скоростью  $v_2 = 580 \text{ м/с}$ . С какой скоростью откатилось при этом орудие?

115. Шар массой  $m_1$ , движущийся горизонтально с некоторой скоростью  $v_1$ , столкнулся с неподвижным шаром массой  $m_2$ . Шары абсолютно упругие, удар прямой, центральный. Какую долю своей кинетической энергии первый шар передал второму?

116. Человек массой  $60 \text{ кг}$ , бегущий со скоростью  $8 \text{ км/ч}$ , догоняет тележку массой  $80 \text{ кг}$ , движущуюся со скоростью  $2,9 \text{ км/ч}$ , и вскакивает на нее. С какой скоростью станет двигаться тележка? С какой скоростью будет двигаться тележка, если человек бежал ей навстречу?

117. Снаряд массой 100 кг, летящий горизонтально вдоль железнодорожного пути со скоростью 500 м/с, попадает в вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. Какую скорость получит вагон, если: 1) вагон стоял неподвижно; 2) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в том же направлении, что и снаряд; 3) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в направлении, противоположном движению снаряда?

118. Граната, летящая со скоростью 10 м/с, разорвалась на два осколка. Бóльший осколок, масса которого составляла 60% массы всей гранаты, продолжал двигаться в прежнем направлении, но со скоростью, равной 25 м/с. Найти скорость меньшего осколка.

119. Тело массой 1 кг, движущееся горизонтально со скоростью 1 м/с, догоняет второе тело 0,5 кг и неупруго сталкивается с ним. Какую скорость получают тела, если: 1) второе тело стояло неподвижно; 2) второе тело двигалось со скоростью 0,5 м/с в том же направлении, что и первое тело; 3) второе тело двигалось со скоростью 0,5 м/с в направлении, противоположном направлению движения первого тела?

120. Конькобежец массой 70 кг, стоя на коньках на льду, бросает в горизонтальном направлении камень массой 3 кг со скоростью 8 м/с. Найти, на какое расстояние откатится при этом конькобежец, если известно, что коэффициент трения коньков о лед равен 0,02.

121. Колесо, вращаясь равномерно при торможении, уменьшило за 1 мин частоту вращения от 300 до 180 об/мин. Момент инерции колеса равен  $2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Найти: 1) угловое ускорение колеса; 2) тормозящий момент; 3) работу сил торможения; 4) число оборотов, сделанных колесом за эту минуту.

122. Вентилятор вращается с угловой скоростью, соответствующей частоте 900 об/мин. После выключения вентилятор, вращаясь равномерно, сделал до остановки 75 об. Работа сил торможения равна 44,4 Дж. Найти: 1) момент инерции вентилятора; 2) момент сил торможения.

123. Маховое колесо, имеющее момент инерции  $I = 245 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , вращается, делая 20 об/с. После того как на колесо перестал действовать тормозящий момент, оно остановилось, сделав 1000 об. Найти: 1) момент сил трения; 2) время, прошедшее от момента прекращения действия вращающего момента до полной остановки колеса.

124. По ободу шкива, насаженного на общую ось с маховым колесом, намотана нить, к концу которой подвешен груз массой

1 кг. На какое расстояние должен опуститься груз, чтобы колесо со шкивом получило угловую скорость, соответствующую частоте 60 об/мин? Момент инерции колеса со шкивом  $0,42 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , радиус шкива 10 см.

125. Маховое колесо начинает вращаться с постоянным угловым ускорением  $\varepsilon = 0,5 \text{ рад/с}^2$  и через  $t_1 = 15 \text{ с}$  после начала движения приобретает момент импульса  $L = 73,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$ . Найти кинетическую энергию колеса через  $t_2 = 20 \text{ с}$  после начала вращения.

126. Маховик вращается с постоянной скоростью, соответствующей частоте  $n = 10 \text{ об/с}$ ; его кинетическая энергия  $W_k = 7,85 \text{ Дж}$ . За сколько времени вращающий момент  $M = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , приложенный к этому маховику, увеличит его угловую скорость в два раза?

127. К ободу диска массой  $m = 5 \text{ кг}$  приложена постоянная касательная сила  $F = 19,6 \text{ Н}$ . Какую кинетическую энергию будет иметь диск через  $\Delta t = 5 \text{ с}$  после начала действия силы?

128. На какой угол надо отклонить однородный стержень, подвешенный на горизонтальной оси, проходящей через верхний конец стержня, чтобы нижний конец стержня при прохождении им положения равновесия имел скорость  $5 \text{ м/с}$ ? Длина стержня 1 м.

129. Однородный стержень длиной 85 см подвешен на горизонтальной оси, проходящей через верхний конец стержня. Какую наименьшую скорость надо сообщить нижнему концу стержня, чтобы он сделал полный оборот вокруг оси?

130. На какую высоту вкатывается по наклонной плоскости обруч, если у основания линейная скорость точек на обруче  $5 \text{ м/с}$ .

131. В цилиндр длиной  $l = 1,6 \text{ м}$ , заполненный воздухом при нормальном атмосферном давлении  $p_0$ , начали медленно вдвигать поршень площадью основания  $S = 200 \text{ см}^2$ . Определить силу  $F$ , действующую на поршень, если его остановить на расстоянии  $l_1 = 10 \text{ см}$  от дна цилиндра.

132. В баллоне находится газ при температуре  $T_1 = 400 \text{ К}$ . До какой температуры  $T_2$  надо нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 1,5 раза?

133. Баллон вместимостью  $V = 20 \text{ л}$  заполнен азотом при температуре  $T = 400 \text{ К}$ . Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на  $\Delta p = 200 \text{ кПа}$ . Определить массу  $m$  израсходованного газа. Процесс считать изотермическим.

134. Баллон вместимостью  $V = 15$  л заполнен аргоном под давлением  $p_1 = 600$  кПа и при температуре  $T_1 = 300$  К. Когда из баллона было взято некоторое количество газа, давление в баллоне понизилось до  $p_2 = 400$  кПа и установилась температура  $T_2 = 260$  К. Определить массу  $m$  аргона, взятого из баллона.

135. Два сосуда одинакового объема содержат кислород. В одном сосуде давление  $p_1 = 2$  МПа и температура  $T_1 = 800$  К, в другом  $p_2 = 2,5$  МПа,  $T_2 = 200$  К. Сосуды соединили трубкой и охладили находящийся в них кислород до температуры  $T = 200$  К. Определить установившееся в сосудах давление  $p$ .

136. Вычислить плотность  $\rho$  азота, находящегося в баллоне под давлением  $p = 2$  МПа и имеющего температуру  $T = 400$  К.

137. Определить относительную молекулярную массу  $M_r$  газа, если при температуре  $T = 154$  К и давлении  $p = 2,8$  МПа он имеет плотность  $\rho = 6,1$  кг/м<sup>3</sup>.

138. Найти плотность  $\rho$  неона при температуре  $T = 400$  К и давлении  $p = 2$  МПа.

139. В сосуде вместимостью  $V = 40$  л находится кислород при температуре  $T = 300$  К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на  $\Delta p = 100$  кПа. Определить массу  $m$  израсходованного кислорода. Процесс считать изотермическим.

140. Определить плотность  $\rho$  водяного пара, находящегося под давлением  $p = 2,5$  МПа и имеющего температуру  $T = 250$  К.

141. Определить количество теплоты  $Q$ , которое надо сообщить кислороду объемом  $V = 50$  л при его изохорном нагревании, чтобы давление газа повысилось на  $\Delta p = 0,5$  МПа.

142. При изотермическом расширении азота при температуре  $T = 280$  К объем его увеличился в два раза. Определить: 1) совершенную при расширении работу  $A$ ; 2) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии; 3) количество теплоты  $Q$ , полученное газом. Масса азота  $m = 0,2$  кг.

143. Кислород массой 320 г нагревают при постоянном давлении от 300 до 310 К. Определить количество теплоты, поглощенное газом, изменение внутренней энергии и работу расширения газа.

144. Объем кислорода при изотермическом расширении при температуре  $T = 300$  К увеличился в 3 раза. Определить работу  $A$ , совершенную газом, и теплоту  $Q$ , полученную при этом. Масса водорода  $m = 200$  г.

145. Азот массой  $m = 0,1$  кг был изобарно нагрет от температуры  $T_1 = 200$  К до температуры  $T_2 = 400$  К. Определить работу  $A$ , совершенную газом, полученную им теплоту  $Q$  и изменение  $\Delta U$  внутренней энергии азота.

146. Объем аргона, находящегося при давлении 80 кПа, увеличился от 1 до 2 л. На сколько изменится внутренняя энергия газа, если расширение производилось: а) изобарно; б) адиабатно?

147. Какая работа  $A$  совершается при изотермическом расширении водорода массой  $m = 5$  г, взятого при температуре  $T = 290$  К, если объем газа увеличивается в три раза?

148. Какая доля  $\omega_1$  количества теплоты  $Q$ , подводимого к идеальному двухатомному газу при изобарном процессе, расходуется на увеличение  $\Delta U$  внутренней энергии газа и какая доля  $\omega_2$  – на работу  $A$  расширения? Рассмотреть три случая, если газ: 1) одноатомный; 2) двухатомный; 3) трехатомный.

149. Определить работу  $A$ , которую совершает азот, если ему при постоянном давлении сообщить количество теплоты  $Q = 21$  кДж. Найти также изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа.

150. Кислород при неизменном давлении  $p = 80$  кПа нагревается. Его объем увеличивается от  $V_1 = 1$  м<sup>3</sup> до  $V_2 = 3$  м<sup>3</sup>. Определить изменение  $\Delta U$  внутренней энергии кислорода, работу  $A$ , совершенную им при расширении, а также теплоту  $Q$ , сообщенную газу.

151. Идеальный газ совершает цикл Карно при температурах теплоприемника  $T_2 = 290$  К и теплоотдатчика  $T_1 = 400$  К. Во сколько раз увеличится коэффициент полезного действия  $\eta$  цикла, если температура теплоотдатчика возрастет до  $T_1' = 600$  К?

152. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура  $T_1$  теплоотдатчика в четыре раза ( $n = 4$ ) больше температуры теплоприемника. Какую долю  $\omega$  количества теплоты, полученного за один цикл от теплоотдатчика, газ отдаст теплоприемнику?

153. Определить работу  $A_2$  изотермического сжатия газа, совершающего цикл Карно, КПД которого  $\eta = 0,4$ , если работа изотермического расширения равна  $A_1 = 8$  Дж.

154. Газ, совершающий цикл Карно, отдал теплоприемнику теплоту  $Q_2 = 14$  кДж. Определить температуру  $T_1$  теплоотдатчика, если при температуре теплоприемника  $T_2 = 280$  К работа цикла  $A = 6$  кДж.

155. Газ, являясь рабочим веществом в цикле Карно, получил от теплоотдатчика теплоту  $Q_1 = 4,38$  кДж и совершил работу  $A = 2,4$  кДж. Определить температуру теплоотдатчика, если температура теплоприемника  $T_2 = 273$  К.

156. Температура нагревателя тепловой машины 450 К. Температура холодильника 300 К. Определить КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, и полную мощность машины, если нагреватель каждую секунду передает ей 1525 Дж теплоты.

157. Во сколько раз увеличится коэффициент полезного действия  $\eta$  цикла Карно при повышении температуры теплоотдатчика от  $T_1 = 380$  К до  $T_1' = 560$  К? Температура теплоприемника  $T_2 = 280$  К.

158. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура теплоотдатчика  $T_1 = 500$  К, температура теплоприемника  $T_2 = 250$  К. Определить КПД  $\eta$  цикла, а также работу  $A_1$  рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа  $A_2 = 70$  Дж.

159. Газ, совершающий цикл Карно, получает теплоту  $Q_1 = 84$  кДж. Определить работу  $A$  газа, если температура  $T_1$  теплоотдатчика в три раза выше температуры  $T_2$  теплоприемника.

160. В цикле Карно газ получил от теплоотдатчика теплоту  $Q_1 = 500$  кДж и совершил работу  $A = 100$  Дж. Температура теплоотдатчика  $T_1 = 400$  К. Определить температуру  $T_2$  теплоприемника.

161. На рис. 7  $AA$  – равномерно заряженная бесконечная плоскость с поверхностной плотностью заряда  $4$  нКл/см<sup>2</sup>, а  $B$  – одноименно с ней заряженный шарик массой  $1$  г, имеющий заряд  $1$  нКл. Какой угол  $\alpha$  с плоскостью  $AA$  образует нить, на которой подвешен шарик? Чему равен модуль силы натяжения нити?

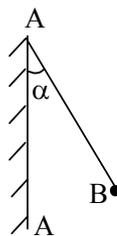


Рис. 7

162. На рис. 7  $AA$  – равномерно заряженная бесконечная плоскость;  $B$  – одноименно с ней заряженный шарик массой  $40$  мг, имеющий заряд  $667$  пКл. Найти поверхностную плотность заряда на плоскости  $AA$ , если модуль силы натяжения нити, на которой висит шарик, равен  $0,49$  мН.

163. В плоском горизонтально расположенном воздушном конденсаторе заряженная сферическая капля ртути находится в равновесии при напряженности электрического поля  $60$  кВ/м. Заряд кап-

ли  $8 \cdot 10^{-19}$  Кл. Найти радиус капли, если плотность ртути равна  $13,6 \text{ г/см}^3$ . Определить также поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора.

164. Точечный заряд  $q = 25 \text{ нКл}$  находится в поле, созданном прямым бесконечным цилиндром радиусом  $1 \text{ см}$ , равномерно заряженным с поверхностной плотностью заряда  $0,2 \text{ нКл/см}^2$ . Определить модуль силы, действующей на заряд, который помещен вне цилиндра на расстоянии  $9 \text{ см}$  от его поверхности.

165. Длинная прямая тонкая проволока несет равномерно распределенный заряд. Вычислить линейную плотность заряда проволоки, если модуль напряженности электрического поля в точке, расположенной на расстоянии  $50 \text{ см}$  от ее середины, равен  $2 \text{ В/см}$ . Определить также модуль силы, действующей на заряд  $q = 5 \text{ нКл}$ , помещенный в этой точке.

166. На металлической сфере радиусом  $10 \text{ см}$  находится заряд с поверхностной плотностью  $0,796 \text{ пКл/см}^2$ . Определить модуль напряженности электрического поля в следующих точках: 1) на расстоянии  $8 \text{ см}$  от центра сферы; 2) на поверхности сферы; 3) вне сферы на расстоянии  $5 \text{ см}$  от ее поверхности. Построить график зависимости модуля напряженности результирующего поля от расстояния.

167. В плоском горизонтально расположенном воздушном конденсаторе, расстояние между пластинами которого равно  $3,84 \text{ мм}$ , находится заряженная частица с зарядом  $4,8 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . Для того чтобы частица находилась в равновесии, между пластинами конденсатора нужно приложить разность потенциалов  $40 \text{ В}$ . Найти массу частицы и заряд на пластинах конденсатора, если площадь одной пластины равна  $100 \text{ см}^2$ .

168. Пылинка массой  $4 \cdot 10^{-9} \text{ мг}$  удерживается в равновесии между горизонтально расположенными обкладками плоского воздушного конденсатора. Разность потенциалов между обкладками равна  $245 \text{ В}$ , а зазор между ними  $1 \text{ см}$ . Определить, во сколько раз величина заряда пылинки больше элементарного заряда. Вычислить также заряд на пластинах конденсатора, если площадь одной пластины равна  $900 \text{ см}^2$ .

169. Свинцовый шарик диаметром  $0,5 \text{ см}$  помещен в глицерин. Определить заряд шарика, если в однородном электростатическом поле, направленном вертикально вверх, шарик оказался взвешенным в глицерине. Найти также поверхностную плотность заряда на

шарике и силу, действующую на шарик со стороны электростатического поля. Напряженность поля в глицерине равна  $4 \text{ кВ/см}$ ; плотность свинца  $11,3 \text{ г/см}^3$ , а плотность глицерина –  $1,26 \text{ г/см}^3$ .

170. Между двумя вертикальными пластинами, находящимися на расстоянии  $1 \text{ см}$  друг от друга, на изолированной отрицательно заряженной нити висит шарик массой  $0,1 \text{ г}$ . После подачи на пластины разности потенциалов  $1 \text{ кВ}$  нить с шариком отклонилась от вертикали на угол  $10^\circ$ . Найти заряд шарика и модуль силы натяжения нити.

171. Определить падение потенциала на сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  (рис. 8), если амперметр показывает  $3 \text{ А}$ ,  $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ . Найти  $I_2$  и  $I_3$  – силу тока в сопротивлениях  $R_2$  и  $R_3$ .

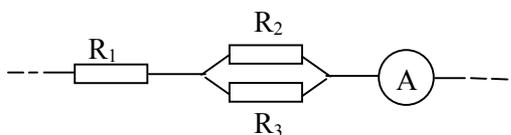


Рис. 8

172. Имеются два одинаковых элемента с ЭДС  $2 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $0,3 \text{ Ом}$ . Как надо соединить эти элементы (последовательно или параллельно), чтобы получить большую силу тока, если: 1) внешнее сопротивление  $0,2 \text{ Ом}$ ; 2) внешнее сопротивление  $16 \text{ Ом}$ ? Вычислить силу тока в каждом из этих случаев.

173. Определить силу тока, показываемую амперметром в схеме на рис. 9. Напряжение на зажимах элемента в замкнутой цепи равно  $2,1 \text{ В}$ ;  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$  и  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ . Сопротивлением амперметра пренебречь.

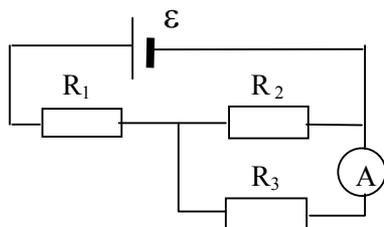


Рис. 9

174. В схеме на рис. 10  $R_2 = 20$  Ом и  $R_3 = 15$  Ом и сила тока, текущего через сопротивление  $R_2$ , равна 0,3 А. Амперметр показывает 0,8 А. Найти сопротивление  $R_1$ .

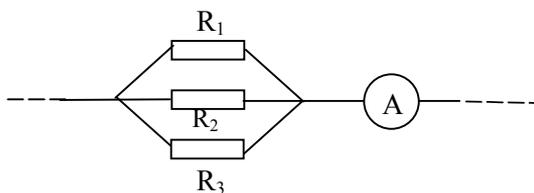


Рис. 10

175. В схеме на рис. 11 ЭДС батареи  $\mathcal{E} = 100$  В,  $R_1 = R_3 = 40$  Ом,  $R_2 = 80$  Ом и  $R_4 = 34$  Ом. Найти: 1) силу тока, текущего через сопротивление  $R_2$ ; 2) падение потенциала на этом сопротивлении. Сопротивлением батареи пренебречь.

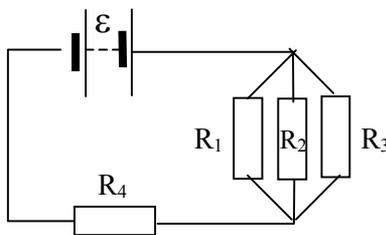


Рис. 11

176. В схеме на рис. 12  $\mathcal{E} = 120$  В,  $R_3 = 20$  Ом,  $R_4 = 25$  Ом и падение потенциала на сопротивлении  $R_1$  равно 40 В. Амперметр показывает 2 А. Найти сопротивление  $R_2$ . Сопротивлением батареи и амперметра пренебречь.

177. В схеме на рис. 12  $\mathcal{E} = 10$  В, внутреннее сопротивление  $r = 1$  Ом и КПД 0,8. Падение потенциала на сопротивлении  $R_1$  4 В, а на сопротивлении  $R_4$  2 В. Какую силу тока показывает амперметр и чему равно падение потенциала на сопротивлении  $R_2$ ?

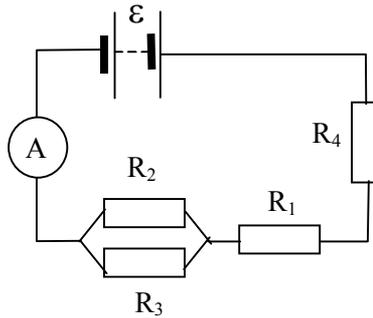


Рис. 12

178. В схеме на рис. 13 ЭДС батареи  $\varepsilon = 100$  В,  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 200$  Ом и  $R_3 = 300$  Ом. Какое напряжение показывает вольтметр, если его сопротивление равно  $2000$  Ом? Сопротивлением батареи пренебречь.

179. В схеме на рис. 13  $R_1 = R_2 = R_3 = 200$  Ом. Вольтметр показывает  $100$  В, сопротивление вольтметра  $R_v = 1000$  Ом. Найти ЭДС батареи. Сопротивлением батареи пренебречь.

180. Найти показание амперметра в схеме на рис. 14. ЭДС батареи  $100$  В, ее внутреннее сопротивление  $2$  Ом. Сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  равны соответственно  $25$  Ом и  $78$  Ом. Мощность, выделяющаяся на сопротивлении  $R_1$ , равна  $16$  Вт. Сопротивлением амперметра пренебречь.

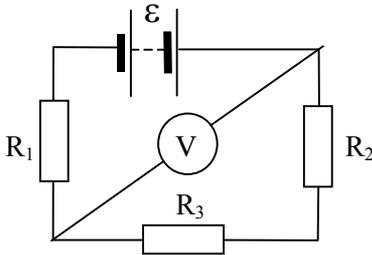


Рис. 13

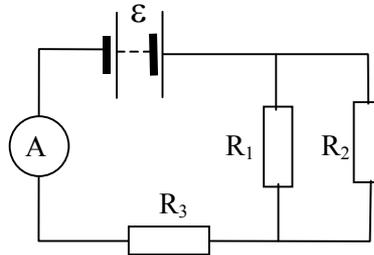


Рис. 14

181. Сила тока в проводнике сопротивлением  $R = 10$  Ом изменяется по закону  $I = I_0 e^{-\alpha t}$ , где  $I_0 = 20$  А,  $\alpha = 10^2$  с $^{-1}$ . Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за время  $t = 10^{-2}$  с.

182. В проводнике за время  $t = 10$  с при равномерном возрастании тока от  $I_1 = 1$  А до  $I_2 = 2$  А выделилось количество теплоты  $Q = 5$  кДж. Найти сопротивление  $R$  проводника.

183. Сила тока в проводнике изменяется со временем по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ . Найти заряд  $q$ , прошедший через поперечное сечение проводника за время  $t$ , равное половине периода  $T$ , если начальная сила тока  $I_0 = 10$  А, циклическая частота  $\omega = 100\pi$  с<sup>-1</sup>.

184. За время  $t = 10$  с при равномерном возрастании тока от нуля до некоторого максимума в проводнике выделилось количество теплоты  $Q = 40$  кДж. Определить среднюю силу тока  $\langle I \rangle$  в проводнике, если его сопротивление  $R = 25$  Ом.

185. За время  $t = 8$  с при равномерном возрастании тока в проводнике сопротивлением  $R = 8$  Ом выделилось количество теплоты  $Q = 500$  Дж. Определить заряд  $q$ , прошедший через проводник, если сила тока в начальный момент времени равна нулю.

186. Определить количество теплоты  $Q$ , выделившееся за время  $t = 10$  с в проводнике сопротивлением  $R = 10$  Ом, если сила тока в нем, равномерно уменьшаясь, изменилась от  $I_1 = 10$  А до  $I_2 = 0$ .

187. Сила тока в цепи изменяется по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ . Определить количество теплоты, которое выделится в проводнике сопротивлением  $R = 10$  Ом за время, равное четверти периода, если период  $T = 0,02$  с,  $I_0 = 4$  А.

188. Сила тока в проводнике изменяется по закону  $I = I_0 \cos \omega t$ . Найти заряд  $q$ , прошедший через поперечное сечение проводника за время  $t$ , равное четверти периода  $T$ , если начальная сила тока  $I_0 = 5$  А, циклическая частота  $100\pi$  с<sup>-1</sup>.

189. Найти количество теплоты, которое выделится в проводнике сопротивлением  $5$  Ом за промежуток времени от  $5$  до  $10$  секунд с момента включения тока, если: а) сила тока постоянна и равна  $10$  А; б) сила тока меняется со временем по закону  $I = 6 + 3t$ .

190. По проводу сопротивлением  $R = 6$  Ом протекало количество электричества  $q = 30$  Кл. Определить количество теплоты, выделенное в проводнике, в следующих случаях: а) по проводу протекал постоянный ток в течение  $t = 24$  с; б) сила тока в проводнике равномерно убывала до нуля в течение  $t = 24$  с.

## Примеры решения задач для контрольной работы №2

**Пример 15.** Два параллельных бесконечно длинных провода D и C, по которым текут в одном направлении электрические токи силой  $I = 60$  А, расположены на расстоянии  $d = 10$  см друг от друга. Определить магнитную индукцию  $\vec{B}$  поля, создаваемого проводниками с током в точке A (см. рис. 15), отстоящей от оси одного проводника на расстоянии  $r_1 = 5$  см, от другого –  $r_2 = 12$  см.

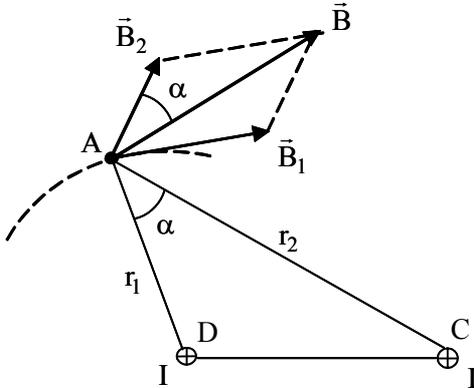


Рис. 15

Векторы  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  направлены по касательной к линиям индукции, создаваемой каждым из проводов в отдельности. Вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной к линии индукции, создаваемой обоими проводами. Угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  равен  $90^\circ$ .

**Решение.** Для нахождения магнитной индукции  $\vec{B}$  в точке A воспользуемся принципом суперпозиции магнитных полей. Для этого определим направления магнитных индукций  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  полей, создаваемых каждым проводником с током в отдельности, и сложим их геометрически:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Направление векторов магнитной индукции, создаваемых прямолинейным проводником, определяется по правилу буравчика (правилу правого винта, см. рис. 16). Если вращать винт таким образом, чтобы его поступательное перемещение совпадало с направлением тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением линий индукции, а вектор  $\vec{B}$  будет направлен по касательной к линии индукции в направлении вращения.

Модуль вектора  $\vec{B}$  может быть найден по теореме косинусов

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2 B_1 B_2 \cos \alpha}, \quad (43)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ .

Магнитные индукции  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  выражаются соответственно через силу тока  $I$  и расстояния  $r_1$  и  $r_2$  от проводов до точки  $A$ :

$$B_1 = \mu_0 I / (2 \pi r_1); \quad B_2 = \mu_0 I / (2 \pi r_2).$$

Подставляя выражения  $B_1$  и  $B_2$  в формулу (43) и вынося  $\mu_0 I / (2 \pi)$  за знак корня, получаем

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi} \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos \alpha}. \quad (44)$$

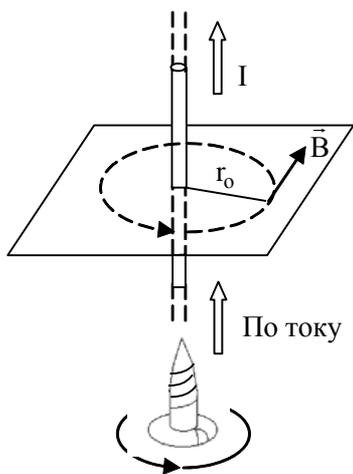


Рис. 16

Вычислим  $\cos \alpha$ . Заметив, что  $\alpha = \angle DAC$  (как углы с соответственно перпендикулярными сторонами), по теореме косинусов запишем

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \alpha,$$

где  $d$  – расстояние между проводами. Отсюда

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2 r_1 r_2};$$

$$\cos \alpha = \frac{5^2 + 12^2 - 10^2}{2 \cdot 5 \cdot 12} = \frac{23}{40}.$$

Подставим в формулу (44) числовые значения физических величин и произведем вычисления:

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1}{(0,05)^2} + \frac{1}{(0,12)^2} + \frac{2}{0,05 \cdot 0,12} \cdot \frac{23}{40}} \text{ Тл} =$$

$$= 3,06 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} = 308 \text{ мкТл}.$$

**Ответ:**  $B = 308 \text{ мкТл}$ .

**Пример 16.** Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов  $U = 600 \text{ В}$ , влетел в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,3 \text{ Тл}$  и начал двигаться по окружности. Вычислить радиус  $R$  окружности.

**Решение.** Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле будет происходить по окружности только в том случае, когда частица влетит в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции  $\vec{v} \perp \vec{B}$ . Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору  $\vec{v}$ , то она сообщит частице (протону) нормальное ускорение  $\vec{a}_n$ .

$$\vec{F}_л = m\vec{a}_n, \quad (45)$$

где  $m$  – масса протона.

На рис. 47 совмещена траектория протона с плоскостью чертежа и дано (произвольно) направление вектора  $\vec{v}$ . Силу Лоренца направим перпендикулярно вектору  $\vec{v}$  к центру окружности (векторы  $\vec{a}_n$  и  $\vec{F}_л$  сонаправлены). Используя правило левой руки, определим направление магнитных силовых линий (направление вектора  $\vec{B}$ ). Вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости чертежа и направлен вверх.

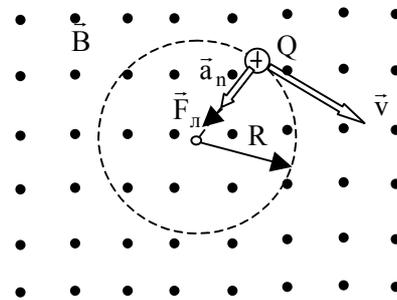


Рис. 17

Перепишем выражение (45) в скалярной форме (в проекциях на радиус):

$$F_{\perp} = ma_n. \quad (46)$$

В скалярной форме  $F_{\perp} = qvB\sin\alpha$ . В нашем случае  $\vec{v} \perp \vec{B}$  и  $\sin\alpha = 1$ , тогда  $F_{\perp} = qvB$ . Так как нормальное ускорение  $a_n = \frac{v^2}{R}$ , то выражение (46) перепишем следующим образом:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}. \quad (47)$$

Отсюда находим радиус окружности

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (48)$$

Скорость протона найдем, воспользовавшись связью между работой сил электрического поля и изменением кинетической энергии протона:

$$qU = W_{k1} - W_{k2},$$

где  $U$  – ускоряющая разность потенциалов, которую прошел протон;

$W_{k1}$  и  $W_{k2}$  – начальная и конечная кинетическая энергия протона. Начальная кинетическая энергия протона  $W_{k1} = 0$ , конечная

$W_{k2} = \frac{mv^2}{2}$ . Тогда получим

$$qU = \frac{mv^2}{2}, \quad v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \quad (49)$$

Подставив (49) в (48) получим

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}. \quad (50)$$

Подставим в формулу (50) числовые значения физических величин и произведем вычисления:

$$R = \frac{1}{0,3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 600}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 1,18 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 11,8 \text{ мм}.$$

**Ответ:**  $R = 11,8 \text{ мм}$ .

**Пример 17.** Электрон движется в однородном магнитном поле ( $B = 10 \text{ мТл}$ ) по винтовой линии, радиус  $R$  которой равен  $1 \text{ см}$  и шаг  $h = 6 \text{ см}$ . Определить период  $T$  обращения электрона и его скорость  $v$ .

**Решение.** Электрон будет двигаться по винтовой линии, если он влетает в однородное магнитное поле под некоторым углом ( $\alpha \neq \pi/2$ ) к линиям магнитной индукции (рис. 18).

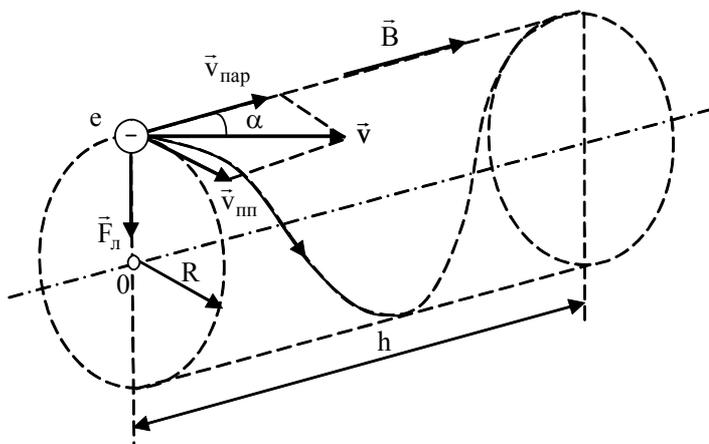


Рис. 18

Разложим, как это показано на рис. 18, скорость  $\vec{v}$  на две составляющие:  $\vec{v}_{\text{пар}}$ , параллельную вектору  $\vec{B}$  и перпендикулярную ему  $\vec{v}_{\text{пп}}$ . Скорость  $\vec{v}_{\text{пар}}$  в магнитном поле не изменяется и обеспечивает перемещение электрона вдоль силовой линии. Скорость  $\vec{v}_{\text{пп}}$  в результате действия силы Лоренца будет изменяться только по направлению  $\vec{F}_L \perp \vec{v}_{\text{пп}}$  (в отсутствие параллельной составляющей ( $\vec{v}_{\text{пар}} = 0$ ) движение электрона происходило бы по окружности в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям). Таким образом, электрон будет участвовать одновременно в двух движениях: равномерном перемещении со скоростью  $\vec{v}_{\text{пар}}$  и равномерном движении по окружности со скоростью  $\vec{v}_{\text{пп}}$ .

Период обращения электрона связан с перпендикулярной составляющей скорости соотношением

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\text{пп}}}. \quad (51)$$

Найдем отношение  $R/v_{\text{пп}}$ . Для этого воспользуемся тем, что сила Лоренца сообщает электрону нормальное ускорение  $a_n = v_{\text{пп}}^2/R$ . Согласно второму закону Ньютона можно написать

$$F_L = ma_n,$$

или

$$|e|v_{\text{пп}}B = \frac{mv_{\text{пп}}^2}{R}, \quad (52)$$

где  $v_{\text{пп}} = v \sin \alpha$ .

Сократив (52) на  $v_{\text{пп}}$ , выразим соотношение  $R/v_{\text{пп}}$  ( $R/v_{\text{пп}} = m/|e|B$ ) и подставим его в формулу (51):

$$T = 2\pi \frac{m}{|e|B}.$$

Произведем вычисления:

$$T = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 3,57 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 3,57 \text{ нс} .$$

Модуль скорость  $v$ , как это видно из рисунка, можно выразить через  $v_{\text{пп}}$  и  $v_{\text{пар}}$ :

$$v = \sqrt{v_{\text{пп}}^2 + v_{\text{пар}}^2} .$$

Из формулы (52) выразим перпендикулярную составляющую скорости:

$$v_{\text{пп}} = \frac{|e|BR}{m} .$$

Параллельную составляющую скорости  $v_{\text{пар}}$  найдем из следующих соображений. За время, равное периоду обращения  $T$ , электрон пройдет вдоль силовой линии расстояние, равное шагу винтовой линии, т.е.  $h = Tv_{\text{пар}}$ , откуда

$$v_{\text{пар}} = T/h .$$

Подставив вместо  $T$  правую часть выражения (52), получим

$$v_{\text{пар}} = \frac{|e|Bh}{2\pi} .$$

Таким образом, модуль скорости электрона

$$v = \sqrt{v_{\text{пар}}^2 + v_{\text{пп}}^2} = \frac{|e|B}{m} \sqrt{R^2 + \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2} .$$

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \sqrt{(0,01)^2 + \left(\frac{0,06}{2 \cdot 3,14}\right)^2} =$$

$$= 2,46 \cdot 10^7 \text{ м/с} = 24,6 \text{ Мм/с}$$

**Ответ:**  $T = 3,57 \text{ нс}$ ;  $v = 24,6 \text{ Мм/с}$ .

**Пример 18.** Короткая катушка, содержащая  $N = 10^3$  витков, равномерно вращается с частотой  $n = 10 \text{ с}^{-1}$  относительно оси АВ, лежащей в плоскости катушки и перпендикулярной линиям однородного магнитного поля ( $B = 0,04 \text{ Тл}$ ). Определить мгновенное значение ЭДС индукции для тех моментов времени, когда плоскость катушки составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями поля и максимальное значение ЭДС индукции. Площадь  $S$  катушки равна  $100 \text{ см}^2$ .

**Решение.** Мгновенное значение ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Psi}{dt}. \quad (53)$$

Потокосцепление  $\Psi = N\Phi$ , где  $N$  – число витков катушки, пронизываемых магнитным потоком  $\Phi$ . Подставив выражение  $\Psi$  в формулу (53), получим

$$\varepsilon_i = - N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (54)$$

При вращении катушки магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий катушку в момент времени  $t$ , изменяется по закону  $\Phi = B S \cos \omega t$ , где  $B$  – магнитная индукция;  $S$  – площадь катушки;  $\omega$  – угловая скорость катушки. Подставив в формулу (54) выражение магнитного потока  $\Phi$  и продифференцировав по времени, найдем мгновенное значение ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = N B S \omega \sin \omega t.$$

Заметив, что угловая скорость  $\omega$  связана с частотой вращения  $n$  катушки соотношением  $\omega = 2\pi n$  и что угол  $\omega t = \pi/2 - \alpha$  (рис. 19), получим

$$\mathcal{E}_i = 2\pi n N B S \cos \alpha$$

(учтено, что  $\sin(\pi/2 - \alpha) = \cos \alpha$ ).

Произведем вычисления

$$\mathcal{E}_i = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 = 25,1 \text{ В.}$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 2\pi n N B S; \quad \mathcal{E}_{\max} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-2} = 50,2 \text{ В.}$$

**Ответ:**  $\mathcal{E}_i = 25,1 \text{ В}$ ;  $\mathcal{E}_{\max} = 50,2 \text{ В}$ .

**Пример 19.** Квадратная проволочная рамка со стороной  $a = 5 \text{ см}$  и сопротивлением  $R = 10 \text{ мОм}$  находится в однородном магнитном поле ( $B = 40 \text{ мТл}$ ). Нормаль к плоскости рамки составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с линиями магнитной индукции. Определить заряд  $q$ , который пройдет по рамке, если магнитное поле выключить.

**Решение.** При выключении магнитного поля произойдет изменение магнитного потока. Вследствие этого в рамке возникает ЭДС индукции, определяемая основным законом электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Возникшая ЭДС индукции вызовет в рамке индукционный ток, мгновенное значение которого можно определить, воспользовавшись законом Ома для полной цепи  $I_i = \mathcal{E}_i / R$ , где  $R$  – сопротивление рамки. Тогда

$$I_i R = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

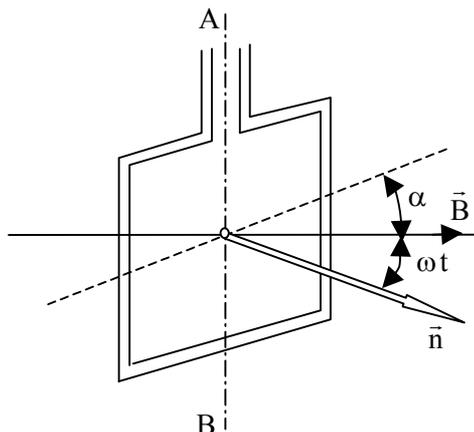


Рис. 19

Так как мгновенное значение силы индукционного тока  $I_i = dq/dt$ , то это выражение можно переписать в виде

$$\frac{dq}{dt} R = - \frac{d\Phi}{dt}, \text{ откуда } dq = - \frac{d\Phi}{R}. \quad (55)$$

Проинтегрировав выражение (55), найдем

$$\int_0^q dq = - \frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi \quad \text{или} \quad q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}.$$

Заметив, что при выключенном поле (конечное состояние)  $\Phi_2 = 0$ , последнее равенство переписывается в виде

$$q = \Phi_1 / R. \quad (56)$$

Найдем магнитный поток  $\Phi_1$ . По определению магнитного потока имеем

$$\Phi_1 = B S \cos \alpha,$$

где  $S$  – площадь рамки.

В нашем случае (рамка квадратная)  $S = a^2$ . Тогда

$$\Phi_1 = B a^2 \cos \alpha. \quad (57)$$

Подставляя (57) в (56), получим

$$q = \frac{B a^2}{R} \cos \alpha.$$

Произведем вычисления:

$$q = \frac{0,04 \cdot 25 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{3}}{0,01} = 8,67 \cdot 10^{-3} \text{ Кл} = 8,67 \text{ мКл}.$$

**Ответ:**  $q = 8,67$  мКл.

**Пример 20.** Для уменьшения потерь света при отражении от стекла на поверхность объектива ( $n_2 = 1,7$ ) нанесена тонкая прозрачная пленка ( $n_1 = 1,3$ ). При какой наименьшей толщине ее произойдет максимальное ослабление отраженного света, длина волны которого  $\lambda = 560$  нм? Считать, что лучи падают нормально к поверхности объектива.

**Решение.** Свет, падая на объектив, отражается как от передней, так и от задней поверхностей тонкой пленки. Отраженные лучи 1 и 2 интерферируют между собой. Так как показатель преломления воздуха ( $n = 1,0$ ) меньше показателя преломления вещества пленки ( $n_1 = 1,3$ ), который, в свою очередь, меньше показателя преломления стекла ( $n_2 = 1,7$ ), то в обоих случаях отражение происходит от среды, оптически более плотной, чем та среда, в которой распространяется падающий луч. Поэтому фаза колебаний луча 1 при отражении в точке А изменяется на  $\pi$  радиан, и точно так же на  $\pi$  изменяется фаза луча 2 при отражении в точке В. Следовательно, результат интерференции этих лучей будет такой же, как если бы никакого изменения фазы колебаний ни у того, ни у другого луча не было.

Результирующая интенсивность минимальна, если оптическая разность хода интерферирующих лучей 1 и 2 равна нечетному числу полуволн:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (58)$$

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 при нормальном падении лучей на пленку ( $i_1 = 0$ ) равна

$$\Delta = 2 dn_1. \quad (59)$$

Из (58) и (59) получаем

$$2 dn_1 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

откуда искомая толщина пленки  $d = (2m + 1) \frac{\lambda}{4n_1}$ . Значению  $d_{\min}$

соответствует  $m = 0$ , следовательно

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n_1} = \frac{560 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 1,3} = 1,07 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

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

**Пример 21.** Определить радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете, если между линзой с радиусом кривизны  $R = 5 \text{ м}$  и плоской поверхностью, к которой она прижата, находится вода. Длина волны света  $\lambda = 589 \text{ нм}$ .

**Решение.** При отражении света от верхней и нижней границ водяной прослойки между плоской поверхностью и соприкасающейся с ней линзой образуются когерентные лучи 1 и 2 (рис. 20), которые при наложении интерferируют. При  $r \ll R$  и нормальном падении света лучи 1 и 2 будут практически параллельны. Оптическая разность хода этих лучей для точек, соответствующих толщине водяной прослойки  $d$ , определяется по формуле

$$\Delta = 2 dn - \frac{\lambda}{2},$$

где  $n$  – показатель преломления воды. Величина  $\frac{\lambda}{2}$  представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении луча 2 от оптически более плотной среды (стекла).

Темные кольца будут наблюдаться в тех местах, где разность хода равна нечетному числу полуволен, т.е.

$$2 dn - \frac{\lambda}{2} = (2m - 1) \frac{\lambda}{2},$$

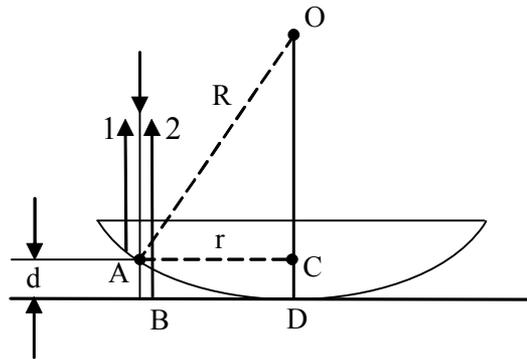


Рис. 20

откуда

$$2 dn = m \lambda ;$$

$$d = \frac{m \lambda}{2n} .$$

Толщина слоя  $d$  между линзой и плоской поверхностью связана с соответствующим радиусом наблюдаемого кольца следующим образом:

$$d = \frac{r_m^2}{2R} .$$

Радиус темного кольца

$$r_k = \sqrt{2 R d} = \sqrt{\frac{R k \lambda}{n}} ;$$

$$r_4 = \sqrt{\frac{5 \cdot 4 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{1,33}} = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

**Ответ:**  $r_4 = 2,97$  мм.

**Пример 22.** Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света образует угол  $\varphi = 97^\circ$  с падающим пучком (рис. 21). Определить показатель преломления  $n_1$  жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.

**Решение.** Согласно закону Брюстера, пучок света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован в том случае, если

$$\text{tg } i = n_{21},$$

где  $n_{21}$  – показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости).

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления. Следовательно,  $\operatorname{tg} i = n_2/n_1$ .

Так как угол падения равен углу отражения, то  $i = \varphi/2$  и, следовательно,  $\operatorname{tg}(\varphi/2) = n_2/n_1$ , откуда

$$n_1 = \frac{n_2}{\operatorname{tg}(\varphi/2)}.$$

Произведем вычисления:

$$n_1 = \frac{1,5}{\operatorname{tg}(97^\circ/2)} = \frac{1,5}{1,13} = 1,33.$$

**Ответ:**  $n_1 = 1,33$ .

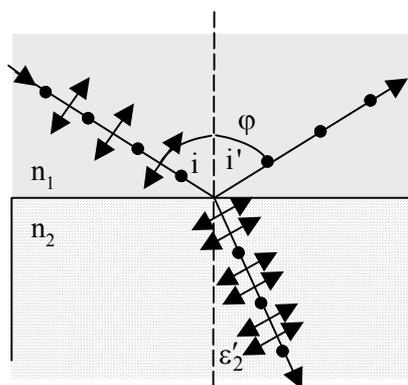


Рис. 21

**Пример 23.** Два николя  $N_1$  и  $N_2$  расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет  $\alpha = 60^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность  $I_0$  естественного света: 1) при прохождении через один николю  $N_1$ ; 2) при прохождении через оба николя. Потери интенсивности света на отражение и поглощение в каждом николе составляет 5%.

**Решение.** 1). Естественный свет, падая на грань призмы Николя (рис. 22), расщепляется вследствие двойного лучепреломления на два пучка: обыкновенный и необыкновенный. Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний необыкновенного пучка лежит в плоскости чертежа (плоскость главного сечения).

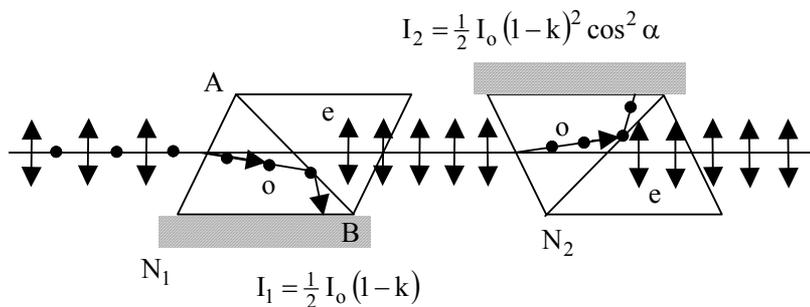


Рис. 22

Плоскость колебаний обыкновенного пучка перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный пучок света (о) вследствие полного отражения от границы АВ отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею. Необыкновенный пучок (е) проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через призму:

$$I_1 = 1/2 I_0 (1 - k).$$

Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении первого николя, найдем, разделив интенсивность  $I_0$  естественного света на интенсивность  $I_1$  света, прошедшего через первый николю:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2 I_0}{I_0 (1 - k)} = \frac{2}{1 - k}. \quad (60)$$

Произведем вычисления

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2}{1 - 0,05} = 2,1.$$

Таким образом, интенсивность света после прохождения через первый николю уменьшается в 2,1 раза.

2). Плоскополяризованный пучок света интенсивностью  $I_1$  падает на второй николю  $N_2$  и также расщепляется на два пучка различной интенсивности: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный пучок полностью поглощается зачерненной поверхностью призмы. Интенсивность  $I_2$  необыкновенного пучка, вышедшего из призмы  $N_2$ , определяется законом Малюса (без учета поглощения и отражения света во втором николе)

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между плоскостью колебаний в поляризованном пучке и плоскостью пропускания николя  $N_2$ .

Учитывая потери интенсивности на поглощение и отражение во втором николе, получаем

$$I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha.$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя найдем, разделив интенсивность  $I_0$  естественного света на интенсивность  $I_2$  света, прошедшего систему из двух николей:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha}.$$

Заменяя отношение  $I_0/I_1$  соотношением (60), получаем

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1 - k)^2 \cos^2 \alpha} = \frac{2}{(1 - 0,05)^2 \cos^2 60^\circ} = 8,86.$$

Таким образом, после прохождения света через два николя интенсивность его уменьшится в 8,86 раза.

**Ответ:** 1)  $I_0/I_1 = 2,1$ ; 2)  $I_0/I_2 = 8,86$ .

**Пример 24.** Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела,  $\lambda_m = 0,58$  мкм. Определить энергетическую светимость  $R_e$  поверхности тела.

**Решение.** Энергетическая светимость  $R_e$  абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры и выражается формулой

$$R_e = \sigma T^4, \quad (61)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  
 $T$  – термодинамическая температура.

Температуру  $T$  можно вычислить с помощью закона смещения Вина

$$\lambda_m = b / T, \quad (62)$$

где  $b$  – постоянная закона смещения Вина.

Используя формулы (61) и (62), получаем

$$R_e = \sigma (b / \lambda_m)^4. \quad (63)$$

Произведем вычисления:

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 = 35,4 \text{ МВт/м}^2.$$

**Ответ:**  $R_e = 35,4 \text{ МВт/м}^2$ .

**Пример 25.** Красная граница фотоэффекта для никеля  $\lambda_k = 257 \text{ мкм}$ . Найти длину волны света, падающего на никелевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $1,5 \text{ В}$ .

**Решение.** Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$hc / \lambda = A + E_k, \quad (64)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны света;

$A$  – работа выхода электронов из металла;

$E_k$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта определяется из условия равенства энергии фотона работе выхода электронов

$$hc / \lambda_k = A, \quad (65)$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

$$E_k = eU, \quad (66)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$U$  – задерживающая разность потенциалов. Подставляя выражения (65) и (66) в (64), получаем

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_k} + eU. \quad (67)$$

Из уравнения (67) найдем длину волны света

$$\lambda = \left( \frac{1}{\lambda_k} + \frac{eU}{hc} \right)^{-1};$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \left( \frac{1}{0,257 \cdot 10^{-6}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \right)^{-1} = \\ &= 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,196 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $\lambda = 0,196$  мкм.

## Контрольная работа № 2

### Варианты контрольной работы

| Варианты | Номера задач |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1        | 201          | 211 | 221 | 231 | 241 | 251 | 261 | 271 | 281 | 291 |
| 2        | 202          | 212 | 222 | 232 | 242 | 252 | 262 | 272 | 282 | 292 |
| 3        | 203          | 213 | 223 | 233 | 243 | 253 | 263 | 273 | 283 | 293 |
| 4        | 204          | 214 | 224 | 234 | 244 | 254 | 264 | 274 | 284 | 294 |
| 5        | 205          | 215 | 225 | 235 | 245 | 255 | 265 | 275 | 285 | 295 |
| 6        | 206          | 216 | 226 | 236 | 246 | 256 | 266 | 276 | 286 | 296 |
| 7        | 207          | 217 | 227 | 237 | 247 | 257 | 267 | 277 | 287 | 297 |
| 8        | 208          | 218 | 228 | 238 | 248 | 258 | 268 | 278 | 288 | 298 |
| 9        | 209          | 219 | 229 | 239 | 249 | 259 | 269 | 279 | 289 | 299 |
| 0        | 210          | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |

191. На рис. 23, а изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с током. Токи текут в разных направлениях. Расстояние АВ между проводниками равно 10 см,  $I_1 = 20$  А,  $I_2 = 30$  А. Найти индукцию магнитного поля, вызванного токами  $I_1$  и  $I_2$  в точках  $M_1$  и  $M_2$ . Расстояния  $M_1A = 2$  см и  $AM_2 = 4$  см.

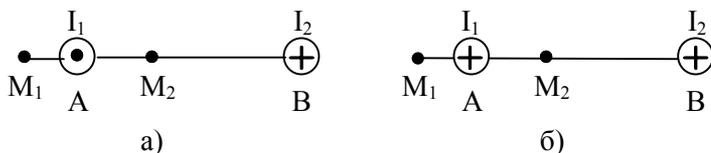
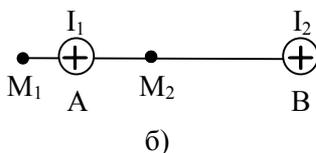


Рис. 23

192. На рис. 23, б изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с током. Токи текут в одном направлении. Расстояние АВ между проводниками равно 10 см,  $I_1 = 20$  А,  $I_2 = 30$  А. Найти индукцию магнитного поля, вызванного токами  $I_1$  и  $I_2$  в точках  $M_1$  и  $M_2$ . Расстояния  $M_1A = 2$  см и  $AM_2 = 4$  см.



193. На рис. 24 изображены сечения трех прямолинейных бесконечно длинных проводников с током. Расстояния  $AB = BC = 5$  см,  $I_1 = I_2 = I$  и  $I_3 = 2I$ . Найти точку на прямой AC, в которой индукция

магнитного поля, вызванного токами  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ , равна нулю. Токи  $I_1$  и  $I_2$  текут в одном направлении, ток  $I_3$  – в противоположном направлении.

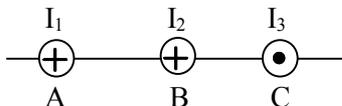


Рис. 24

194. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены перпендикулярно друг другу и находятся в одной плоскости (рис. 25). Найти индукцию магнитного поля в точках  $M_1$  и  $M_2$ , если  $I_1 = 2$  А и  $I_2 = 3$  А. Расстояния  $AM_1 = AM_2 = 1$  см,  $BM_1 = CM_2 = 2$  см.

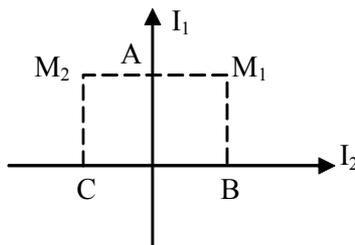


Рис. 25

195. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены перпендикулярно друг другу и находятся во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 26). Найти индукцию магнитного поля в точках  $M_1$  и  $M_2$ , если  $I_1 = 2$  А и  $I_2 = 3$  А. Расстояния  $AM_1 = AM_2 = 1$  см и  $AB = 2$  см.

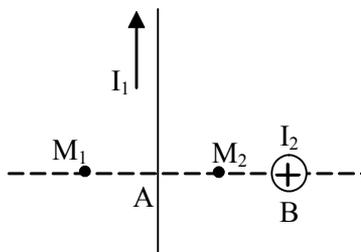


Рис. 26

196. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены параллельно на расстоянии 10 см друг от друга. По проводникам текут токи  $I_1 = I_2 = 5$  А в противоположных направлениях. Найти числовое значение и направление индукции магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от каждого проводника.

197. Вычислить индукцию магнитного поля, создаваемого отрезком АВ прямолинейного проводника с током, в точке С, расположенной на перпендикуляре к середине этого отрезка на расстоянии 5 см от него. По проводнику течет ток 20 А. Отрезок АВ проводника виден из точки С под углом  $60^\circ$ .

198. Ток 20 А идет по длинному проводнику, согнутому под прямым углом. Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии 10 см.

199. Найти индукцию магнитного поля на оси кругового контура на расстоянии 3 см от его плоскости. Радиус контура 4 см, сила тока в контуре 2 А.

200. Индукция магнитного поля в центре кругового витка радиусом 11 см равна  $0,8 \cdot 10^{-4}$  Тл. Найти индукцию магнитного поля на оси витка на расстоянии 10 см от его плоскости.

441. Два иона разных масс с одинаковыми зарядами влетели в однородное магнитное поле и стали двигаться по окружностям радиусами  $R_1 = 3$  см и  $R_2 = 1,73$  см. Определить отношение масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

442. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов  $U = 500$  В, попал в вакууме в однородное магнитное поле и движется по окружности радиуса  $R = 10$  см. Определить модуль магнитной индукции, если скорость электрона перпендикулярна линиям магнитной индукции.

443. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов  $U = 800$  В и, влетев в однородное магнитное поле  $B = 47$  мТл, стал двигаться по винтовой линии с шагом  $h = 6$  см. Определить радиус  $R$  винтовой линии.

444. Альфа-частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $U = 300$  В и, попав в однородное магнитное поле, стала двигаться по винтовой линии радиусом  $R = 1$  см и шагом  $h = 4$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  поля.

445. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $U = 100$  В и, влетев в однородное магнитное поле ( $B = 0,1$  Тл), стала двигаться по винтовой линии с шагом  $h = 6,5$  см и радиусом  $R = 1$  см. Определить отношение заряда частицы к ее массе.

446. Протон прошел ускоряющую разность потенциалов  $U = 300$  В и влетел в однородное магнитное поле ( $B = 20$  Тл) под углом  $\alpha = 30^\circ$  к линиям магнитной индукции. Определить шаг  $h$  и радиус  $R$  винтовой линии, по которой будет двигаться протон в магнитном поле.

447. Альфа-частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U$ , стала двигаться в однородном магнитном поле ( $B = 50$  мТл) по

винтовой линии с шагом  $h = 5$  см и радиусом  $R = 1$  см. Определить ускоряющую разность потенциалов, которую прошла альфа-частица.

448. Частица с зарядом  $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл и с кинетической энергией  $W_k = 1$  кэВ попала в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,21$  Тл и стала двигаться по окружности с радиусом 1 м. Определить период обращения частицы, ее скорость и массу.

449. Альфа-частица, кинетическая энергия которой равна 500 эВ, влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное скорости ее движения. Индукция магнитного поля 0,1 Тл. Найти: 1) силу, действующую на частицу; 2) радиус окружности, по которой движется частица; 3) период обращения частицы.

450. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 6$  кВ, влетает в однородное магнитное поле под углом  $\alpha = 30^\circ$  к направлению поля и начинает двигаться по винтовой линии. Индукция магнитного поля  $B = 1,3 \cdot 10^{-2}$  Тл. Найти: 1) радиус витка винтовой линии; 2) шаг винтовой линии.

451. В однородном магнитном поле ( $B = 0,1$  Тл) равномерно с частотой  $n = 5$  с<sup>-1</sup> вращается стержень длиной  $l = 50$  см так, что плоскость его вращения перпендикулярна линиям индукции магнитного поля, а ось вращения проходит через один из его концов. Определить индуцируемую на концах стержня разность потенциалов  $U$ .

452. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл вращается с частотой  $n = 10$  с<sup>-1</sup> стержень длиной  $l = 20$  см. Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит через один из концов стержня перпендикулярно его оси. Определить разность потенциалов  $U$  на концах стержня.

453. В проволочное кольцо с диаметром  $d = 20$  см и сопротивлением  $R = 10$  Ом вставили постоянный магнит. При этом по цепи прошел заряд  $q = 50$  мкКл. Определить индукцию магнитного поля, создаваемую магнитом, в пределах кольца, если предположить, что в этой области поле однородно.

454. Рамка из провода сопротивлением  $R = 0,04$  Ом равномерно вращается в однородном магнитном поле ( $B = 0,6$  Тл). Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Площадь рамки  $S = 200$  см<sup>2</sup>. Определить заряд  $q$ , который потечет по рамке при изменении угла между нормалью к рамке и линиями индукции: 1) от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ ; 2) от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ .

455. Проволочный виток диаметром  $D = 5$  см и сопротивлением  $R = 0,02$  Ом находится в однородном магнитном поле ( $B = 0,3$  Тл). Плоскость витка составляет угол  $\varphi = 40^\circ$  с линиями индукции. Какой заряд  $q$  протечет по витку при выключении магнитного поля?

456. Рамка, содержащая  $N = 200$  витков тонкого провода, может свободно вращаться относительно оси, лежащей в плоскости рамки. Площадь рамки  $S = 50$  см<sup>2</sup>. Ось рамки перпендикулярна линиям индукции однородного магнитного поля ( $B = 0,05$  Тл). Определить максимальную ЭДС, которая индуцируется в рамке при ее вращении с частотой  $n = 40$  с<sup>-1</sup>.

457. На соленоид длиной 20 см и диаметром 4 см надето изолированное кольцо того же диаметра. По обмотке соленоида течет ток 0,1 А. Диаметр проволоки, из которой сделан соленоид, 0,1 мм. Определить ЭДС индукции в кольце, если за 0,01 с ток в его обмотке равномерно снижается до нуля.

458. В однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,1 Тл, вращается катушка, состоящая из 200 витков. Ось вращения катушки перпендикулярна ее оси и направлению магнитного поля. Период обращения катушки равен 0,2 с, площадь поперечного сечения катушки 4 см<sup>2</sup>. Найти максимальную ЭДС индукции во вращающейся катушке.

459. На соленоид длиной 20 см и площадью поперечного сечения 30 см<sup>2</sup> надет проволочный виток. Соленоид имеет 320 витков, и по нему идет ток в 3 А. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке, когда ток в соленоиде выключается в течение 0,001 с?

460. Катушка из 100 витков площадью 15 см<sup>2</sup> вращается с частотой 5 Гц в однородном магнитном поле индукцией 0,2 Тл. Ось вращения перпендикулярна оси катушки и линиям индукции поля. Определить максимальную ЭДС индукции в катушке.

231. На поверхность стеклянного объектива ( $n = 1,5$ ) нанесена тонкая пленка, показатель преломления которой  $n = 1,2$  («просветляющая» пленка). При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света с длиной волны 550 нм?

232. На стеклянную пластину ( $n = 1,5$ ) нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления  $n = 1,3$ . Пластина освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 640$  нм, падающим на пластинку нормально. Ка-

кую минимальную толщину  $d_{\min}$  должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость?

233. На тонкую глицериновую пленку толщиной  $d = 1,5$  мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить длины волн  $\lambda$  лучей видимого участка спектра ( $0,4 \leq \lambda \leq 7,6$  мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции.

234. На мыльную пленку ( $n = 1,33$ ) падает белый свет под углом  $45^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет ( $\lambda = 600$  нм)?

235. На стеклянную пластину положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Найти радиус  $R$  линзы, если радиус четвертого, темного кольца Ньютона в отраженном свете  $r_4 = 2$  мм.

236. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить минимальную толщину  $d_{\min}$  пленки, если показатель преломления материала пленки  $n = 1,4$ .

237. Между пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус  $r_3$  третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм равен  $0,82$  мм. Радиус кривизны линзы  $R = 0,5$  м.

238. На мыльную пленку ( $n = 1,3$ ), находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине отраженный свет с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

239. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ( $\lambda = 590$  нм). Радиус кривизны  $R$  линзы равен  $5$  см. Определить толщину  $d_3$  воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье светлое кольцо.

240. Плосковыпуклая стеклянная линза с оптической силой в одну диоптрию лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в проходящем свете  $r_5 = 1,1$  мм. Определить длину световой волны  $\lambda$ .

241. На дифракционную решетку, содержащую  $n = 400$  штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол  $\varphi$  дифракции, соответствующий последнему максимуму.

242. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается длина волны  $\lambda = 780$  нм спектра третьего порядка?

243. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Чему должна быть равна постоянная дифракционной решетки, чтобы в направлении  $\varphi = 41^\circ$  совпадали максимумы двух линий:  $\lambda_1 = 653,3$  нм и  $\lambda_2 = 410,2$  нм?

244. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ( $\lambda = 630$  нм) видна в спектре третьего порядка под углом  $\varphi = 60^\circ$ . Какая спектральная линия видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? Какое число штрихов на 1 мм длины имеет дифракционная решетка?

245. На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна ( $\lambda = 600$  нм). Угол отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному минимуму,  $\varphi = 20^\circ$ . Определить ширину  $a$  щели.

246. На дифракционную решетку, содержащую  $n = 100$  штрихов на 1 мм, нормально падает монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум второго порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол  $\Delta\varphi = 16^\circ$ . Определить длину волны  $\lambda$  света, падающего на решетку.

247. Постоянная дифракционной решетки в  $n = 4$  раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол  $\alpha$  между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

248. Расстояние между штрихами дифракционной решетки  $d = 4$  мкм. На решетку падает нормально свет с длиной волны  $\lambda = 0,58$  мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

249. На пластину со щелью, ширина которой  $a = 0,05$  мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,7$  мкм. Определить угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующий первому дифракционному минимуму.

250. Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр третьего порядка на угол  $\varphi_1 = 30^\circ$ . На какой угол  $\varphi_2$  отклоняет она спектр четвертого порядка?

251. Параллельный пучок света переходит из глицерина в стекло так, что пучок, отраженный от границы раздела этих сред, оказывается максимально поляризованным. Определить угол  $\gamma$  между падающим и преломленным пучками.

252. Пучок света последовательно проходит через два николя, плоскости пропускания которых образуют между собой угол  $\varphi = 40^\circ$ . Принимая, что потери интенсивности света на отражение и поглощение в каждом никеле составляют 15%, найти, во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый никель.

253. Угол падения  $i$  луча на поверхность стекла равен  $60^\circ$ . При этом отраженный пучок света оказывается максимально поляризованным. Определить угол  $\gamma$  преломления луча.

254. Угол  $\alpha$  между плоскостями пропускания поляроидов равен  $50^\circ$ . Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в  $n = 8$  раз. Пренебрегая потерей света при отражении, определить коэффициент поглощения  $k$  света в поляроидах.

255. Пучок света, идущий в стеклянном сосуде ( $n = 1,6$ ) с глицерином, отражается от дна сосуда. При каком угле падения отраженный пучок света максимально поляризован?

256. Пучок света переходит из жидкости в стекло. Угол падения  $i$  пучка равен  $60^\circ$ , угол преломления  $\gamma = 50^\circ$ . При каком угле падения  $i_b$  пучок света, отраженный от границы раздела этих сред, будет максимально поляризован?

257. Угол преломления луча в жидкости  $\gamma = 35^\circ$ . Определить показатель преломления  $n$  жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.

258. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их главными плоскостями

равен  $\alpha$ . Как поляризатор, так и анализатор поглощают и отражают 8% падающего на них света. Оказалось, что интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9% интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найти угол  $\alpha$ .

259. Угол Брюстера  $i_b$  при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен  $57^\circ$ . Определить скорость света в этом кристалле.

260. Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный ( $n = 1,5$ ) сосуд, и отражается ото дна. Отраженный луч полностью поляризован при попадании его на дно сосуда под углом  $42^\circ 37'$ . Найти показатель преломления жидкости.

261. Абсолютно черное тело имеет температуру  $T_1 = 500$  К. Какова будет температура  $T_2$  тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в  $n = 5$  раз?

262. Определить температуру  $T$  и энергетическую светимость  $R_e$  абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_m = 600$  нм.

263. Из смотрового окошечка печи излучается поток  $\Phi_e = 4$  кДж/мин. Определить температуру  $T$  печи, если площадь окошечка  $S = 8$  см<sup>2</sup>.

264. Поток излучения абсолютно черного тела  $\Phi_e = 10$  кВт. Максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_m = 0,8$  мкм. Определить площадь  $S$  излучающей поверхности.

265. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{m1} = 760$  нм) на фиолетовую ( $\lambda_{m2} = 390$  нм)?

266. Муфельная печь, потребляющая мощность  $P = 1$  кВт, имеет отверстие площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Определить долю  $\eta$  мощности, рассеиваемой стенкой печи, если температура ее внутренней поверхности равна 1 кК.

267. Средняя энергетическая светимость  $R$  поверхности Земли равна  $0,54$  Дж/(см<sup>2</sup>·мин). Какова температура  $T$  поверхности Земли, если условно считать, что она излучает как серое тело с коэффициентом черноты  $a_T = 0,25$ ?

268. Вычислить энергию, излучаемую за время  $t = 1$  мин с площади  $S = 1$  см<sup>2</sup> абсолютно черного тела, температура которого  $T = 1000$  К.

269. В каких областях спектра лежат длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если источником света служит: 1) спираль электрической лампы (T = 3000 K); 2) поверхность Солнца (T = 6000 K); 3) атомная бомба, в которой в момент взрыва развивается температура около 10 млн. градусов? Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

270. Мощность излучения абсолютно черного тела равна 34 кВт. Найти температуру этого тела, если известно, что поверхность его равна  $0,6 \text{ м}^2$ .

271. Красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_{\text{к}} = 310 \text{ нм}$ . Определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падает свет с длиной волны  $\lambda = 200 \text{ нм}$ .

272. На поверхность калия падает свет с длиной волны  $\lambda = 150 \text{ нм}$ . Определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

273. На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны  $\lambda = 200 \text{ нм}$ . Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов  $U_{\text{з min}}$ , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

274. Какова должна быть длина волны  $\gamma$ -излучения, падающего на платиновую пластину, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была  $v_{\text{max}} = 3 \text{ Мм/с}$ ?

275. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,25 \text{ мкм}$ ). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов  $U_{\text{з min}} = 0,96 \text{ В}$ . Определить работу выхода  $A$  электронов из металла.

276. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,1 \text{ мкм}$ . Красная граница фотоэффекта  $\lambda_{\text{к}} = 0,3 \text{ мкм}$ . Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

277. На металлическую пластину направлен монохроматический пучок света с частотой  $\nu = 7,3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . Красная граница  $\lambda_{\text{к}}$  фотоэффекта для данного материала равна 560 нм. Определить максимальную скорость  $v_{\text{max}}$  фотоэлектронов.

278. На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U_{\text{з}} = 1,5 \text{ В}$ . Определить длину волны  $\lambda$  света, падающего на пластину.

279. На пластину падает монохроматический свет ( $\lambda = 0,42$  мкм). Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U_3 = 0,95$  В. Определить работу  $A$  выхода электронов с поверхности пластины.

280. На цинковую пластину падает пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,2$  мкм). Определить максимальную кинетическую энергию и максимальную скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов.

281. В одном акте деления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  освобождается энергия 200 МэВ. Определить: 1) энергию, выделяющуюся при распаде всех ядер этого изотопа урана массой  $m = 1$  кг; 2) массу каменного угля с удельной теплотой сгорания  $q = 29,3$  МДж/кг, эквивалентную в тепловом отношении 1 кг урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

282. Мощность  $P$  двигателя атомного судна составляет 15 МВт; его КПД равен 30%. Определить месячный расход ядерного горючего при работе этого двигателя. За каждый акт деления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется энергия 200 МэВ.

283. Считая, что в одном акте деления ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  освобождается энергия 200 МэВ, определить массу  $m$  этого изотопа, подвергшегося делению при взрыве атомной бомбы с тротильным эквивалентом  $30 \cdot 10^6$  кг, если тепловой эквивалент тротила равен 4,19 МДж/кг.

284. Какое количество энергии освободится, если разделятся все ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , содержащиеся в 1 г? При делении одного ядра освобождается энергия 200 МэВ.

285. Сколько ядер  ${}_{92}^{235}\text{U}$  должно делиться за 1 секунду, чтобы тепловая мощность ядерного реактора была равна 1 Вт? Считать, что при каждом распаде выделяется энергия 200 МэВ.

286. Тепловая мощность ядерного реактора 10000 кВт. Какое количество  ${}_{92}^{235}\text{U}$  будет израсходовано реактором за сутки? При каждом распаде выделяется энергия 200 МэВ.

287. Атомная электростанция мощностью 500 МВт имеет КПД 20%. Определить годовой расход ядерного горючего, если в каждом акте деления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется 200 МэВ энергии.

288. Найти электрическую мощность атомной электростанции, расходующей 0,1 кг  ${}_{92}^{235}\text{U}$  в сутки, если КПД станции равен 16%. В каждом акте деления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется 200 МэВ энергии.

289. Сколько  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  производит реактор мощностью 100 МВт в течение месяца, если принять, что в среднем в одном акте деления ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  возникает 1,5 ядра плутония и выделяется 200 МэВ энергии.

290. Вычислить КПД двигателей атомного ледокола, если мощность их  $P_1 = 3,2 \cdot 10^4$  кВт, а атомный реактор расходует  $m = 200$  г урана-235 в сутки. Вследствие деления одного ядра атома выделяется энергия  $E_0 = 200$  МэВ.

## Информационно-методическое обеспечение

### Основная литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990-2002.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 1-3. – М.: Наука, 1988.
3. Савельев И.В. Курс физики. В 3 т. Т. 1-3. – М.: Наука, 1989.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 1-5. – М.: Изд-во «Астрель АСТ», 2002.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2001-2002.
6. Наркевич И.И., Волмянский Э.И., Лобко С.И. Физика для вузов. В 2 т. Т. 1-2. – Мн.: Вышэйшая школа, 1994.
7. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1973-1990; СПб: Спец. лит., Лань, 1999.
8. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1981, 1988.

### Дополнительная литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1-5. – М.: Наука, 1983.
2. Дмитриева В.Ф., Прокофьев В.Л. Основы физики. – М.: Высшая школа, 2001.
3. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – М.: Наука, 1982, 1988, 2001.
4. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. – М.: Высшая школа, 1994, 1996, 2003.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Некоторые физические постоянные

| Физическая постоянная        | Обозначение  | Значение                                 |
|------------------------------|--------------|--|
| Ускорение свободного падения | $g$          | 9,81 м/с <sup>2</sup>                    |
| Постоянная Авогадро          | $N_A$        | 6,02·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup> |
| Молярная газовая постоянная  | $R$          | 8,31 Дж/(моль·К)                         |
| Постоянная Больцмана         | $k$          | 1,38·10 <sup>-23</sup> Дж/К              |
| Элементарный заряд           | $e$          | 1,60·10 <sup>-19</sup> Кл                |
| Скорость света в вакууме     | $c$          | 3,00·10 <sup>8</sup> м/с                 |
| Постоянная Планка            | $h$          | 6,63·10 <sup>-34</sup> Дж·с              |
| Атомная единица массы        | а.е.м.       | 1,660·10 <sup>-27</sup> кг               |
| Электрическая постоянная     | $\epsilon_0$ | 8,85·10 <sup>-12</sup> Ф/м               |
| Магнитная постоянная         | $\mu_0$      | 4 $\pi$ ·10 <sup>-7</sup> Гн/м           |

### Показатель преломления

| Вещество | $n$  |
|----------|------|
| Вода     | 1,33 |
| Глицерин | 1,47 |
| Стекло   | 1,50 |

### Работа выхода электронов

| Металл  | $A$ , Дж              | $A$ , эВ |
|---------|-----------------------|----------|
| Калий   | 3,5·10 <sup>-19</sup> | 2,2      |
| Литий   | 3,7·10 <sup>-19</sup> | 2,3      |
| Платина | 10·10 <sup>-19</sup>  | 6,3      |
| Цинк    | 6,4·10 <sup>-19</sup> | 4,0      |

## Содержание

|  |     |
|--|-----|
| Предисловие. . . . .   | 3   |
| Рабочая программа курса физики для студентов-заочников<br>строительных специальностей. . . . . | 4   |
| Методические указания по выполнению<br>контрольных работ. . . . .                              | 16  |
| Основные определения и формулы. . . . .  | 18  |
| Физические основы механики. . . . .  | 18  |
| Статистическая физика. Термодинамика. . . . .  | 30  |
| Электростатика. . . . .  | 38  |
| Постоянный ток. Электромагнетизм. . . . .  | 48  |
| Оптика, атомная и ядерная физика. . . . .  | 65  |
| Примеры решения задач для контрольной работы № 1. . . . .                                      | 73  |
| Контрольная работа № 1. . . . .  | 95  |
| Примеры решения задач для контрольной работы № 2. . . . .                                      | 108 |
| Контрольная работа № 2. . . . .  | 126 |
| Информационно-методическое обеспечение. . . . .  | 137 |
| Приложение. . . . .  | 138 |

Учебное издание

КУЖИР Павел Григорьевич  
САМОЙЛЮКОВИЧ Владимир Александрович  
ЗВЕРЕВА Валентина Владимировна

Ф И З И К А

Контрольные задания и учебные материалы

Учебно-методическое пособие для студентов-заочников  
инженерно-строительных специальностей

Редактор Т.Н.Микулик. Корректор М.П.Антонова  
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

---

Подписано в печать 05.04.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 8,1. Уч.-изд. л. 6,4. Тираж 300. Заказ 25.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.  
Лицензия ЛВ №155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект  
Ф.Скорины, 65.