

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

# ФИЗИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для студентов-заочников  
инженерно-экономических  
специальностей вузов



ВЫСШАЯ ШКОЛА 1988

ББК 22.3  
Ф51  
УДК 53

Авторы:  
В. Л. Прокофьев, В. Ф. Дмитриева, В. А. Рябов,  
В. М. Гладской, П. И. Самойленко

Физика: Методические указания и контрольные задания  
Ф51 для студентов-заочников инженерно-экономических специальностей вузов/В. Л. Прокофьев, В. Ф. Дмитриева, В. А. Рябов и др.; Пол. ред. В. Л. Прокофьева.—М.: Высш. шк., 1988.—111 с., ил.

Ф 170410000(4309000000)—437  
001(01)—88

ББК 22.3  
53

© Министерство высшего и среднего специального образования, СССР, 1988

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика — наука о природе: о строении, свойствах и взаимодействии составляющих ее материальных тел и полей. Главная цель этой науки — выявить и объяснить законы природы, которыми определяются все физические явления. Физика основывается на экспериментально установленных фактах. Занимая центральное место среди других наук в объяснении законов природы, физика играет первостепенное значение в формировании научного материалистического мировоззрения.

Основными задачами курса физики в вузах являются:

1. Создание у студентов основ достаточно широкой теоретической подготовки в области физики, позволяющей будущим инженерам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающей им возможность использования новых физических принципов в тех областях техники, в которых они специализируются.

2. Формирование у студентов научного мышления и марксистско-ленинского мировоззрения, в частности, правильного понимания границ применимости различных физических понятий, законов, теорий и умения оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных или математических методов исследования.

3. Усвоение основных физических явлений и законов классической и современной физики, методом физического исследования.

4. Выработка у студентов приемов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих студентам в дальнейшем решать инженерные задачи.

5. Ознакомление студентов с современной научной аппаратурой и электронно-вычислительной техникой, выработки у студентов начальных павыков проведения экспериментальных исследований различных физических явлений с применением ЭВМ и оценки погрешности измерений.

Цель настоящего учебно-методического пособия — оказать помощь студентам-заочникам технологических и инженерно-экономических специальностей высших учебных заведений в изучении курса физики.

В пособии материал курса физики разделен на шесть контрольных работ. Перед каждым контрольным заданием даются пояснения к рабочей программе, приводятся основные законы и формулы, примеры решения задач. Кроме того, в пособии даны общие методические указания, рабочая программа, примерная схема решения задач, применения ЭВМ (микрокалькулятора) при решении задач, задачи для самостоятельного решения и некоторые справочные материалы.

Сведения, связанные со спецификой изучения курса физики в данном вузе, сообщаются студентам кафедрами физики дополнительно.

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Основной формой обучения студента-заочника является самостоятельная работа над учебным материалом. Для облегчения этой работы кафедры физики вузов организуют чтение лекций, практические занятия и лабораторные работы. Поэтому процесс изучения физики состоит из следующих этапов:



## Литература

- Трофимова Т. И. Курс физики. М., 1985.  
Шубин А. С. Курс общей физики. М., 1976.  
Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. М., 1987 и др.  
Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. М., 1985.  
Фирсанов Е. В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. М., 1978.  
Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М., 1980.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Рабочая программа составлена на основе программы курса физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений, утвержденной Учебно-методическим управлением по высшему образованию 26 июня 1981 г.

### Введение

Предмет физики. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Связь физики с марксистско-ленинской философией и другими науками.

### Физические основы механики

Механическое движение как простейшая форма движения материи. Представление о свойствах пространства и времени. Преобразования Галилея. Механический принцип относительности. Классический закон сложения скоростей. Постулаты специальной теории относительности. Преобразования Лойтера. Понятие одновременности. Релятивистское изменение длин и промежутков времени. Релятивистский закон сложения скоростей.

Поступательное движение твердого тела. Закон инерции и инерциальные системы отсчета. Второй закон Ньютона. Центр масс (центр инерции) механической системы — закон его движения. Закон сохранения количества движения. Энергия как универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Работа силы и ее выражение через криволинейный интеграл. Закон сохранения энергии. Понятие о релятивистской динамике. Основной закон релятивистской динамики материальной точки. Релятивистское выражение для кинетической энергии. Взаимосвязь массы и энергии. Соотношение между полной энергией и импульсом частицы. Границы применимости классической механики.

Поле как форма материи, осуществляющая силовое взаимодействие между частицами вещества. Потенциальное поле сил. Потенциальная энергия материальной точки во внешнем силовом поле и ее связь с силой, действующей на материальную точку. Понятие о градиенте скалярной функции. Направленность, потенциал поля. Принцип суперпозиции. Закон сохранения механической энергии и его связь с однородностью времени. Удар абсолютно упругих и неупругих тел. Закон сохранения и превращения энергии как проявление неупряткимости материи и ее движения.

Элементы кинематики вращательного движения. Угловая скорость и угловое ускорение, их связь с линейными величинами. Момент силы. Момент инерции тела относительно неподвижной оси вращения. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. Кинетическая энергия вращающегося тела. Работа при вращательном движении. Закон сохранения момента импульса.

### Основы молекулярной физики и термодинамики

Статистический метод исследования и его связь с учением диалектического материализма о соотношении случайности и необходимости. Вывод склонения молекулярно-кинетической теории идеальных газов для давления. Уравнения молекулярно-кинетической теории идеальных газов для давления.

Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетическое толкование термодинамической температуры. Число степеней свободы молекул. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул. Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по скоростям и энергии теплового движения. Закон Больцмана для распределения частиц во внешнем потенциальном поле. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул.

Явления переноса в термодинамически неравновесных системах. Опытные законы диффузии, теплопроводности и внутреннего трения. Молекулярно-кинетическая теория этих явлений. Термодинамический метод исследования. Термодинамические параметры. Равновесные состояния и процессы, их изображение на термодинамических диаграммах. Работа газа при изменении его объема. Количество теплоты. Теплоемкость. Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам и адабатическому процессу идеального газа.

Классическая молекулярно-кинетическая теория теплоемкостей идеальных газов и ее ограниченность. Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы (цикл). Цикл Карпо и его КПД для идеального газа. Энтропия. Энтропия идеального газа. Второе начало термодинамики. Статистическое толкование второго начала термодинамики.

Отступление от законов идеального газа. Реальные газы.

Управление Ван-дер-Ваальса. Сравнение изотерм Ван-дер-Ваальса с экспериментальными. Критическое состояние вещества. Фазовые переходы I и II рода. Внутренняя энергия реального газа.

## Электростатика

Закон сохранения электрического заряда. Электрическое поле. Основные характеристики электростатического поля — напряженность и потенциал поля. Напряженность как градиент потенциала. Поток вектора напряженности. Теорема Остроградского — Гаусса и ее применение к расчету поля. Электрическое поле в веществе. Свободные и связанные заряды в диэлектриках. Электронная и ориентационная поляризация. Поляризованность. Теорема Остроградского — Гаусса для электрического поля в диэлектрике. Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость среды. Сегнетоэлектрики.

Поле внутри проводника и у его поверхности. Распределение зарядов в проводнике. Электроемкость уединенного проводника. Конденсаторы. Энергия заряженного уединенного проводника, конденсатора. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии.

## Постоянный электрический ток

Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования. Классическая электронная теория электропроводности металлов. Выход закона Ома в дифференциальной форме из электронных представлений. Обобщенный закон Ома в интегральной форме. Разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение. Границы применимости закона Ома. Ток в газах. Плазма. Дебаевский радиус экранирования. Работа выхода электронов из металла. Термоэлектронная эмиссия.

## Электромагнетизм

Магнитное поле. Магнитная индукция. Закон Ампера. Магнитный поток. Контур с током в магнитном поле. Закон Био — Савара — Лапласа и его применение к расчету магнитного поля. Вихревой характер магнитного поля. Закон полного тока. Работа по перемещению проводника и контура с током в магнитном поле. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Принцип действия циклических ускорителей заряженных частиц. Эффект Холла.

Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Закон Ленца. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия системы проводников с током. Объемная плотность энергии магнитного поля.

Магнитные моменты атомов. Намагниченность. Типы магнетиков. Элементарная теория дна- и парамагнетизма. Магнитная восприимчивость вещества. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики. Критика намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Ток смещения. Уравнение Максвелла для электромагнитного поля в интегральной и дифференциальной формах. Относительный характер электрической и магнитной сопровождающих электромагнитного поля.

#### Колебания и волны

Гармонические колебания (механические и электромагнитные) и их характеристики. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Математический, физический маятники. Электрический колебательный контур. Сложение гармонических колебаний одного Энергия гармонических колебаний. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных и одинаковой частоты. Апериодический процесс. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний (механических и электромагнитных) и его решение. Апериодический процесс. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний (механических и электромагнитных) и его решение. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Случай резонанса.

Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Уравнение бегущей волны. Волновое уравнение. Фазовая и дисперсия волны. Энергия волны. Принцип суперпозиции волн. Групповая скорость. Когерентность. Интерференция волн. Образование стоячих волн. Уравнение стоячей волны и его анализ.

Дифференциальное уравнение электромагнитной волны. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии. Вектор Умова — Пойнтинга. Излучение диапозона.

#### Волновая оптика

Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Время и длина когерентности. Расчет интерференционной картины от двух когерентных волн. Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Принцип Гюйгенса — Френеля. Метод зон Френеля. Прямоугольное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии. Дифракция Фраунгофера на одной щели и на ней на круглом отверстии. Дифракция сплошных приборов. Дифракция на решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на структурно-когерентной решетке. Формула Вульфа — Брэгга. Исследование структуры кристаллов. Понятие о голограммах. Поляризация света. Естественный и плоскополяризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Закон Малюса. Искусственная оптическая анизотропия. Дисперсия света. Области нормальной и аномальной дисперсии. Электронная теория дисперсии света. Излучение Вавилова — Черенкова.

#### Квантовая природа излучения

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

#### Элементы атомной физики и квантовой механики

Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма свойств вещества. Формула де Броиля. Соотношение неопределенностей как проявление

корпускулярно-волнового дуализма свойств материи. Волновая функция и ее статистический смысл. Ограничность механического детерминизма. Уравнение Шредингера для стационарных состояний. Туннельный эффект. Частица в одномерной прямоугольной «потенциальной яме». Квантование энергии и импульса частицы. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение. Лазер.

#### Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Состав ядра по Иваненко — Гейзенбергу. Нуклоны. Дефект массы и энергия связи ядра. Взаимодействие нуклонов и понятие о свойствах и природе ядерных сил.

Закономерности и происхождение альфа-, бета- и гамма-излучений атомных ядер. Ядерные реакции и законы сохранения. Реакция деления ядра. Цепная реакция деления. Понятие о ядерной энергетике. Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций. Элементарные частицы. Их классификация и взаимопревращаемость. Четыре типа фундаментальных взаимодействий.

#### Элементы физики твердого тела

Кристаллическая решетка. Характер теплового движения в кристаллах. Фононы. Теплоемкость кристаллической решетки. Характеристическая температура Дебая. Закон Дюлонга — Ити. Теория Эйнштейна. Модель Дебая. Элементы зонной теории твердых тел. Распределение электронов проводимости в металле по энергиям при 0 К. Энергия Ферми. Влияние температуры на распределение электронов. Вырожденный электронный газ. Электропроводность металлов. Сверхпроводимость. Энергетические зоны в кристаллах. Распределение электронов по энергетическим зонам. Валентная зона и зона проводимости. Металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Примесная проводимость полупроводников,  $p-n$ -переход и его вольт-амперная характеристика. Понятия об основных проблемах современной физики.

#### Примерная схема решения задач

Предложить единую схему решения задач невозможно. Однако можно рекомендовать определенную последовательность при решении задач.

Приступая к решению задач по какому-либо разделу, необходимо ознакомиться по учебной литературе и данному методическому пособию с конкретными понятиями и соотношениями этого раздела. Разобрать приведенные в пособии примеры решения задач изучаемого раздела.

При решении задач целесообразно придерживаться следующей схемы:

- 1) по условию задачи представьте себе физическое явление, о котором идет речь. Сделайте краткую запись условия, выразив исходные данные в единицах СИ;
- 2) сделайте, где это необходимо, чертеж, схему или рисунок, поясняющий описанный в задаче процесс;
- 3) напишите уравнения или систему уравнений, отображающие физический процесс;
- 4) используйте чертежи и условие задачи, преобразуйте уравнения так, чтобы в них входили лишь исходные данные и табличные величины;
- 5) решив задачу в общем виде, проверьте ответ по равенству размерностей величин, входящих в расчетную формулу;
- 6) произведите вычисления и, получив числовой ответ, оцените его реальность.

### Применение микрокалькулятора при решении задач

Важнейшим средством современного научного исследования является математическое моделирование физических явлений и исследование этих моделей с помощью ЭВМ. Современные ЭВМ позволяют проводить сложнейшие расчеты. В некоторых областях науки, например астрофизике, проведение реальных экспериментов практически невозможно, поэтому исследователями проводится вычислительный эксперимент. ЭВМ нужны не только для проведения машинного эксперимента, но и для обработки результатов реальных экспериментов. Современный физический эксперимент часто дает столько информации, что обработать ее без ЭВМ практически невозможно.

Для решения любой задачи необходим алгоритм. Под алгоритмом понимают понятное и точное предписание ЭВМ совершить последовательность действий для достижения указанной цели или решения конкретной задачи. Всякий алгоритм строится в расчете на конкретного исполнителя. Таким исполнителем для проведения инженерных и студенческих расчетов различного вида заданий являются микрокалькуляторы семейства «Электроника». Это электронно-вычислительное устройство миниатюрных размеров индивидуального пользования. Оно может быть успешно использовано при решении задач, предлагаемых в контрольных работах. Выполняя вычисления с помощью микрокалькулятора, Вы экономите время, освобождая его для изучения теоретических основ курса физики.

Прежде чем пользоваться микрокалькулятором, внимательно ознакомьтесь с руководством по эксплуатации:

- изучите общие сведения об устройстве;
- ознакомьтесь с правилами подготовки его к работе.

Рассмотрим решение следующих задач с применением микрокалькулятора.

1. Вычислить эффективный диаметр молекул азота, если его критическая температура 126 К, критическое давление 3,40 МПа.

Дано:  $T_{kp}=126$  К;  $p_{kp}=3,40 \cdot 10^6$  Па.

Найти:  $d$ .

Решение. Азот, согласно условию задачи, должен подчиняться уравнению

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

Постоянную  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса с достаточной степенью точности считают равной учтенному собственному объему 1 моль газа. В 1 моль газа находится  $6,02 \cdot 10^{23}$  молекул ( $N_A=6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ ), следовательно, объем одной молекулы равен  $\pi d^3/6=b/(4N_A)$ , откуда  $d=\sqrt[3]{3b/(2\pi N_A)}$ . Постоянная  $b=RT_{kp}/(8p_{kp})$ , тогда

$$d = \sqrt[3]{\frac{3RT_{kp}}{16\pi p_{kp} N_A}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 8,31 \text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 126 \text{К}}{16 \cdot 3,14 \cdot 3,40 \cdot 10^6 \text{Па} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1}}}.$$

Вычисляем на калькуляторе выражение

$$\sqrt[3]{\frac{3 \cdot 126 \cdot 8,31}{16 \cdot 3,14 \cdot 3,40 \cdot 10^6 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}}$$

по программе

3 [x] 126 [x] 8,31 [÷] 16 [÷] 3,14 [÷] 3,40 [BII] 6  
[ ] 6,02 [BII] 23 [F] [X√y] 3 [ - ]

На индикаторе видим показания: 3,126 — 10, т. е.  $3,126 \cdot 10^{-10}$ .

Так как данное выражение состоит только из произведения и частного, то, согласно правилам округления, его надо округлить до такого числа значащих цифр, которое имеет наименьшее точное исходное данное. В данном случае ответ будет  $3,13 \cdot 10^{-10}$  м.

2. Определить, сколько ядер в 1 г радиоактивного  $^{38}\text{Sr}$ , распадается в течение одного года.

Дано:  $m=10^{-3}$  кг;  $T=27$  лет;  $t=1$  год.

Найти:  $N'$ .

Решение. Для определения числа атомов, содержащихся в 1 г  $^{38}\text{Sr}$ , используем соотношение

$$N_0 = v N_A = \frac{m}{M} N_A, \quad (1)$$

где  $N_A$  — постоянная Авогадро;  $v$  — число молей, содержащихся в массе данного элемента;  $M$  — молярная масса изотопа. Между молярной массой изотопа и его относительной массой существует соотношение

$$M = 10^{-3} A \text{ кг/моль}. \quad (2)$$

Для всякого изотопа относительная атомная масса весьма близка к его массовому числу  $A$ , т. е. для данного случая  $M=10^{-3} \cdot 90 \text{ кг/моль}=-9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$ .

Используя закон радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где  $N_0$  — начальное число нераспавшихся ядер в момент  $t=0$ ;  $N$  — число нераспавшихся ядер в момент  $t$ ;  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада, определяем количество распавшихся ядер  $^{38}\text{Sr}$  в течение 1 года:

$$N' = N_0 - N = N_0 [1 - e^{-\lambda t}]. \quad (4)$$

Учитывая, что постоянная радиоактивного распада связана с периодом полураспада соотношением  $\lambda=\ln 2/T$ , получаем

$$N' = N_0 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\ln 2}{T} t \right) \right]. \quad (5)$$

Подставляя (1) с учетом (2) в выражение (5), имеем

$$N' = \frac{m}{10^{-3} A} N_A \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\ln 2}{T} t \right) \right]. \quad (6)$$

Произведя вычисления по формуле (6), найдем

$$N' = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{10^{-3} \cdot 90 \text{ кг/моль}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\ln 2}{27 \text{ лет}} \cdot 1 \text{ год} \right) \right].$$

Вычислим на калькуляторе выражение

$$\left[ 1 - \exp \left( -\frac{\ln 2}{27} \cdot 1 \right) \right] \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{10^{-3}}{10^{-3} \cdot 90}$$

по программе

2 [ln] [x] 1 [÷] 27 [=] [/] [F] [e<sup>x</sup>] [x<sup>Π</sup>] 1 [-]  
[Π<sup>+</sup>] [x] [=] [x] 6,02 [BII] 23 [x] 1 [BII] 3 [=]  
[÷] 1 [BII] 3 [=]

Показания индикатора: 1,69532 20, т. е.  $1,69532 \cdot 10^{20}$ . В данном случае ответ будет  $1,70 \cdot 10^{20}$ .

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ\*

**Гравитационная постоянная** — коэффициент пропорциональности, входящий в закон тяготения Ньютона:  $F = Gm_1 m_2 / r^2$ , где  $F$  — сила притяжения двух материальных точек массами  $m_1$  и  $m_2$ , находящихся на расстоянии  $r$ .

**Постоянная Авогадро** определяет число структурных элементов (атомов, молекул, ионов или других частиц) в единице количества вещества (в одном моле). Названа в честь итальянского ученого А. Авогадро.

**Универсальная (молярная) газовая постоянная**, входящая в уравнение состояния одного моля идеального газа:  $pV_m = RT$ , где  $p$  — давление газа,  $V_m$  — молярный объем газа,  $T$  — термодинамическая температура газа. Газовая постоянная по своему физическому смыслу — работа расширения одного моля идеального газа под постоянным давлением при нагревании на 1 К. С другой стороны, газовая постоянная — разность молярных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме  $C_p - C_v = R$ .

**Постоянная Больцмана** равна отношению молярной газовой постоянной к постоянной Авогадро:  $k = R/N_A$ .

Постоянная Больцмана входит в ряд важнейших соотношений физики: в уравнении состояния идеального газа, в выражение для средней энергии теплового движения частиц, связывает энтропию физической системы с ее термодинамической вероятностью. Названа в честь австрийского физика Л. Больцмана.

**Молярный объем идеального газа**, т. е. объем, приходящийся на количество вещества газа 1 моль при нормальных условиях ( $p_0 = 101,325$  кПа,  $T_0 = 273,15$  К), определяется из соотношения  $V_m = RT_0/p_0$ .

**Элементарный электрический заряд** ( $e$ ), наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный по значению заряду электрона. Почти все элементарные частицы обладают электрическим зарядом  $+e$  или  $-e$  или являются незаряженными.

**Постоянная Фарадея** — равна произведению постоянной Авогадро на элементарный электрический заряд (заряд электрона)  $F = N_A e$ . Названа в честь английского физика М. Фарадея.

**Скорость света в вакууме** (скорость распространения любых электромагнитных волн) представляет собой предельную скорость распространения любых физических воздействий и инвариантна при переходе от одной системы отсчета к другим.

**Постоянная Стефана — Больцмана** входит в закон, определяющий полную (по всем длинам волн) испускательную способность черного тела:  $R = \sigma T^4$ , где  $R$  — испускательная способность черного тела,  $T$  — термодинамическая температура. Закон сформулирован на основании экспериментальных данных австрийским физиком И. Стефаном (1879), теоретически получен австрийским физиком Л. Больцманом (1884).

**Постоянная Вина** входит в закон смещения Вина, утверждающий, что длина  $\lambda_{\max}$ , на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения, обратно пропорциональна термодинамической температуре  $T$  излучающего тела:  $\lambda_{\max} = b_1/T$ .

**Постоянная Планка (квант действия)** определяет широкий круг физических явлений, для которых существует дискретность величин с размерностью действия. Введена немецким физиком М. Планком (1900) при установлении закона распределения энергии в спектре излучения черного тела.

**Постоянная Ридберга** входит в выражение для уровней энергии и частот излучения атомов (спектральные серии):  $v = R \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right)$ , где  $n_i$  и  $n_k$  — числа, определяющие начальный и конечный уровни энергии. Для каждой спектральной серии  $n_i$  постоянно, а  $n_k = n_i + 1, n_i + 2, \dots$ . Введена шведским физиком И. Р. Ридбергом.

\* Значения некоторых фундаментальных физических постоянных даны в табл. 1 Приложения.

**Радиус первой бороской орбиты** (в теории датского физика Н. Бора) — радиус ближайшей к ядру (протону) электронной орбиты. В квантовой механике определяется как расстояние от ядра, на котором с наибольшей вероятностью можно обнаружить электрон в невозбужденном атоме водорода.

**Комптоновская длина волны** определяет изменение длины волн элекромагнитного излучения при комптоновском рассеянии на электроне  $\lambda_c = \frac{\hbar}{m_e c}$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $m_e$  — масса покоя электрона,  $c$  — скорость света в вакууме. Эффект открыт американским физиком А. Комптоном (1923).

**Атомная единица массы** применяется в атомной и ядерной физике для выражения масс элементарных частиц атомов и молекул. 1 а. е. м. равна  $1/12$  массы нуклида углерода  $^{12}\text{C}$ .

**Электрическая  $\epsilon_0$  и магнитная  $\mu_0$  постоянные** — физические постоянные, входящие в формулы электромагнетизма:  $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ , где  $c$  — скорость света вакууме.

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Движение точки описывается уравнением  $s = 2t^3 - 10t^2 + 8$ . Найти скорость и ускорение точки в момент  $t = 4$  с.

2. Уравнение вращения твердого тела  $\varphi = 3t^2 + t$ . Определить частоту вращения твердого тела, угловую скорость и ускорение через 10 с после начала вращения.

3. Материальная точка, находящаяся в покое, начала двигаться по окружности с постоянным тангенциальным ускорением  $0,6 \text{ м/с}^2$ . Определить нормальное и полное ускорение точки в конце пятой секунды после начала движения. Сколько оборотов сделает точка за это время, если радиус окружности  $5 \text{ см}$ ?

4. Диск, вращаясь вокруг оси, проходящей через его середину, делает  $180 \text{ об/мин}$ . Определить линейную скорость вращения точек на внешней окружности диска и его радиус, если известно, что точки, лежащие ближе к оси вращения на 8 см, имеют скорость  $8 \text{ м/с}$ .

5. Снаряд, массой 20 кг, летящий горизонтально, попадает в платформу с песком массой 10 кг и застревает в песке. С какой скоростью летел снаряд, если платформа начинает двигаться со скоростью  $1 \text{ м/с}$ ?

6. Частица массой  $6,5 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  упруго соударяется с частицей массой  $1,1 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$ , находящейся в покое. После удара первая частица движется в направлении, противоположном первоначальному. Во сколько раз изменилась энергия первой частицы?

7. Катящийся цилиндр массой 2 кг остановлен силой 9,81 Н на пути 0,5 м. Вычислить скорость цилиндра до торможения.

8. Маховик и легкий шкив насыжены на горизонтальную ось. К шкиву с помощью нити привязан груз, который, опускаясь равноускоренно, прошел 2 м за 4 с. Момент инерции маховика  $0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Определить массу груза, если радиус шкива 6 см. Массой шкива пренебречь.

9. Во сколько раз кинетическая энергия, которую необходимо сообщить телу для удаления его за пределы земного тяготения, больше кинетической энергии, необходимой для того, чтобы это тело вывести на круговую орбиту искусственного спутника Земли, вращающегося на высоте 3000 км над ее поверхностью?

10. Определить период обращения искусственного спутника Земли, если известно, что он вращается по круговой орбите радиусом 7800 км.

11. В точках  $A$  и  $B$ , расположенных на расстояниях 3 и 2,4 м от точки  $C$ , находятся два источника синусоидальных колебаний. Амплитуды колебаний одинакова. Найти амплитуду результирующего колебания в точке  $C$ .

12. В баллоне емкостью 30 л находится сжатый воздух при температуре 17°C. После того как часть воздуха израсходовали, давление понизилось на

2 МПа. Какая масса воздуха была израсходована, если температура его оставалась постоянной?

13. Сколько молекул азота находится в сосуде емкостью 1 л, если средняя квадратичная скорость движения молекул азота 500 м/с, а давление на стены сосуда 1 кПа?

14. Определить среднее число столкновений между молекулами воздуха за 1 с в 1 см<sup>3</sup> при температуре 7°C, если плотность воздуха 0,08 кг/м<sup>3</sup>.

15. Вычислить коэффициент диффузии воздуха при давлении 10<sup>5</sup> Па и температуре 17°C.

16. Определить молярную массу газа, если его удельные теплоемкости равны:  $c_V = 650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $c_p = 910 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Чему равны молярные теплоемкости  $C_V$  и  $C_p$  этого газа?

17. Определить полную энергию молекул кислорода, находящихся при температуре 47°C, если его масса 64 кг. Какова энергия молекул кислорода, приходящаяся на вращательное движение?

18. Азот массой 2 кг при температуре 17°C и давлении 10<sup>5</sup> Па сжимают до давления 1 МПа. Определить работу, затраченную на сжатие, если газ сжимают: 1) изотермически, 2) аднабатично.

19. При изобарном расширении 1 кг воздуха его объем увеличился на 100 л. Найти температуру и работу при расширении, если начальное давление 10<sup>5</sup> Па, а начальная температура 15°C.

20. Определить изменение энтропии при изотермическом расширении 1 г водорода, если объем газа увеличился в три раза.

21. При изобарном расширении 2 г гелия объем изменился в десять раз. Каково изменение энтропии?

22. Тешлоловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя 127°C, холодильника 15°C. На сколько надо изменить температуру нагревателя (при неизменной температуре холодильника), чтобы увеличить КПД машины в два раза?

23. Два шарика массой по 1 г подвесены на нитях длиной 25 см в общей точке подвеса. После того как шарикам сообщили заряд, они разошлись на угол 60°. Определить силы отталкивания и взаимного тяготения шариков, а также их заряд.

24. В вершинах квадрата со стороной 1 м помещены заряды по 1 нКл. Определить напряженность и потенциал поля в центре квадрата для случаев, когда: а) все заряды одного знака; б) два соседних — положительные, а два других — отрицательные.

25. Электроны влетают параллельно обкладкам плоского воздушного конденсатора длиной 10 см. Зазор между обкладками 4 см, разность потенциалов 700 В. За время полета в конденсаторе электроны отклонились на 2 мм. С какой скоростью влетели электроны?

26. Заряд — 1 нКл перемещается под действием сил поля, создаваемого зарядом +3 нКл из точки, где потенциал равен 200 В, в точку поля, потенциал которой надо определить. Работа перемещения равна 1 мкДж. Каково расстояние между этими точками?

27. Батарея из четырех параллельно соединенных плоских конденсаторов емкостью 0,004 мкФ каждый заряжена до потенциала 1600 В. Определить заряд на пластинах конденсатора и количество теплоты, выделяющееся при разряде этой батареи.

28. По вольфрамовой нити диаметром 0,03 мм под действием электрического поля напряженностью 450 В/м течет ток 0,5 А. До какой температуры накалена нить?

29. Плоский воздушный конденсатор обладает энергией 4 мкДж. Определить разность потенциалов, напряженность поля и объемную плотность энергии, если зазор между пластинами 4 мм, а площадь 100 см<sup>2</sup>.

30. Какова плотность тока, текущего по резистору с удельным сопротивлением 3 мкОм·м и длиной 3 м, если на его концах поддерживается разность потенциалов 36 В.

31. В резисторе сопротивлением 1 Ом за 5 сила тока линейно возрастает от 0 до 15 А. Какое количество теплоты выделилось за последнюю секунду?

32. Удельная тепловая мощность, выделяемая в никелиновом проводнике,

40 Дж/(м<sup>3</sup>·с). Определить плотность тока и напряженность поля в проводнике.

33. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам текут токи 4 и 6 А. Расстояние между проводниками 15 см. Определить геометрическое место точек, в которых индукция магнитного поля равна нулю. Рассмотреть случаи совпадающего и противоположного направления токов.

34. Проводник длиной 1 м согнут в виде квадрата. Определить индукцию магнитного поля и напряженность в точке пересечения диагоналей квадрата, если по проводнику течет ток 4 А.

35. Частица, обладающая энергией 16 МэВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией 2,4 Тл по окружности радиусом 24,5 см. Определить заряд этой частицы, если ее скорость 2,72·10<sup>7</sup> м/с.

36. Как нужно расположить прямолинейный алюминиевый проводник в однородном горизонтальном магнитном поле с индукцией 0,04 Тл и какой синус проводника 1 мм.

37. По соленоиду течет ток 1 А. Магнитный поток, пронизывающий первичное сечение сердечника, 2 мкВб. Определить индуктивность соленоида, если он имеет 500 витков.

38. Сила тока в соленоиде равномерно возрастает от 0 до 10 А за 1 мин. При этом соленоид накапливает энергию 20 Дж. Какая ЭДС индуцируется в соленоиде?

39. Определить работу внешних сил, совершающую при перемещении проводника за 30 мин, если проводник движется со скоростью 36 км/ч перпендикулярно вектору магнитной индукции магнитного поля, напряженность которого 15 А/м ( $\mu = 1$ ). Длина проводника 20 см, сила тока в нем 0,5 А.

40. Гармоническое колебание происходит по закону  $s = 0,5 \sin(300t + \frac{\pi}{4})$ .

41. Колебательный контур состоит из конденсатора с электроемкостью 200 пФ и катушки индуктивностью 0,5 мГн (без сердечника). Определить период собственных электромагнитных колебаний контура и длину излучающей волны.

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

43. Плоская электромагнитная волна  $E = 100 \sin(6,28 \cdot 10^8 t - 4,55x)$  распространяется в веществе. Определить диэлектрическую проницаемость вещества, если  $\mu = 1$ .

44. Какую наименьшую толщину должна иметь пленка из скипидара, если на нее под углом 30° падает белый свет и она в проходящем свете кажется желтой ( $\lambda = 0,58 \text{ мкм}$ )?

45. Какова наименьшая толщина мыльной пленки, если при наблюдении под углом 30° к поверхности мыльной пленки в отраженном свете она окрашивается в фиолетовый цвет? Длина волны падающего света 0,4 мкм.

46. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, падает свет с длиной волны 600 нм. Определить наибольший порядок спектра, который можно получить данной решеткой.

47. Угол между спектрами вторых порядков равен 36°. Определить длину волны света, падающего на дифракционную решетку, период которой  $c = 4 \text{ мкм}$ .

48. Найти угол полной поляризации при отражении от черного зеркала. Показатель преломления его 1,327.

49. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы поляризация солнечного света, отраженного от поверхности воды, была максимальной?

50. Определить показатель преломления стекла, если при отражении света от этого стекла отраженный свет будет полностью поляризован при угле преломления 30°.

51. Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении его через два николя, плоскости поляризации которых составляют 60°?

52. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла 0,66 мкм. Металл освещается светом, длина волны которого 0,4 мкм. Определить максимальную скорость электронов, выбиваемых светом из металла.
53. Фотон с энергией 0,500 МэВ рассеялся на свободном электроне под углом 60°. Найти энергию рассеянного фотона, кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. Считать, что кинетической энергией электрона до соударения можно пренебречь.
54. Определить массу и импульс фотона, энергия которого равна 10 кэВ.
55. Энергия электрона возбужденного атома водорода 0,85 эВ. Вычислить длину волны де Броиля для электрона.
56. Определить частоту света, излучаемого двукратно ионизированным атомом лития при переходе электрона на уровень с главным квантовым числом 2, если радиус орбиты электрона изменился в девять раз.
57. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра  $^{14}\text{N}$ .

#### Ответы к задачам для самостоятельного решения

1. 16 м/с; 28 м/с<sup>2</sup>. 2. 49; 61 рад/с; 6 с<sup>-2</sup>. 3. 180 м/с<sup>2</sup>; 180,01 м/с<sup>2</sup>; 24. 4. 4,5 м/с; 0,23 м. 5. 501 м/с. 6. В 0,79 раза. 7. 1,81 м/с. 8. 0,36 кг. 9. В 2,93 раза. 10. 1,9 ч. 11. 14,4 см. 12. 720 г. 13. 2,58·10<sup>20</sup>. 14. 2,05·10<sup>8</sup> с<sup>-1</sup>. 15. 1,4×10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>/с. 16. 32·10<sup>-3</sup> кг/моль; 20,8 Дж/(моль·К); 29,1 Дж/(моль·К). 17. 12,5 кДж; 5 кДж. 18. 382 кДж; 390 кДж. 19. 50°С; 10,13 кДж. 20. 4,57 Дж/К. 21. 19 Дж/К. 22. На 250 К. 23. 5,7·10<sup>-8</sup> Н; 1,07·10<sup>-15</sup> Н, 2·10<sup>-7</sup> Кл. 24. 0; 50 В; 36 В/м; 0,25·2,1·10<sup>7</sup> м/с. 26. 1200 В; 0,11 м. 27. 2,6×10<sup>-5</sup> Кл; 0,02 Дж. 28. 2030°С. 29. 600 В; 1,5·10<sup>5</sup> В/м; 0,1 Дж/м<sup>3</sup>. 30. 4 МА/м<sup>2</sup>. 31. 181 Дж. 32. 1·10<sup>4</sup> А/м<sup>2</sup>; 4 мВ/м. 33. 0,06 м; 0,3 м. 34. 3,6 А/м; 4,5·10<sup>-7</sup> Тл. 35. 3,2·10<sup>-19</sup> Кл. 36. 0,02 А. 37. 1 мГн. 38. 6,7 мВ. 39. 3,76·10<sup>-4</sup> Дж. 40. 0,5 м. 48 Гц; 0,021 с; 1 рад. 41. 6,3·10<sup>-8</sup> с; 18,8 м. 42. 60 м/с. 43. 4,7. 44. 0,22 мкм. 45. 81 нм. 46. 3. 47. 602 нм. 48. 53°. 49. 37°. 50. 1,73. 51. В восемь раз. 52. 6,05·10<sup>5</sup> м/с. 53. 0,335 МэВ; 0,165 МэВ; 0,235·10<sup>-21</sup> кг·м/с. 54. 1,78·10<sup>-32</sup> кг; 5,34·10<sup>-24</sup> кг·м/с. 55. 1,3 нм. 56. 6,58·10<sup>15</sup> Гц. 57. 0,112 а. с. м.; 104,6 МэВ.

## УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО РАЗДЕЛАМ КУРСА ФИЗИКИ

### I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

#### ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

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

Контрольная работа № 1 построена так, что позволяет проверить знания студентов по ключевым вопросам классической механики и элементам специальной теории относительности. Решая задачи по кинематике, в которых необходимо использовать математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления, студент должен научиться определять мгновенные скорости и ускорение по заданной зависимости координаты от времени и решать обратные задачи.

Задачи на динамику материальной точки и поступательного движения твердого тела охватывают такие вопросы, как закон движения центра масс механической системы, закон сохранения количества движения, работа силы и ее выражение через криволинейный интеграл, связь кинетической энергии механической системы с работой сил, приложенных к этой системе, закон сохранения механической энергии. Тщательного изучения и понимания требуют вопросы о поле как форме материи, осуществляющей взаимодействие между частицами вещества или телами, о потенциальной энергии материальной точки во внешнем поле и потенциальной энергии механической системы. Эти вопросы рассматриваются в задачах на примере гравитационного поля.

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

В контрольную работу включены задачи по элементам специальной теории относительности, которые охватывают следующие вопросы: относительность одновременности, длин и промежутков времени, релятивистский закон сложения скоростей, зависимость релятивистской массы от скорости, соотношение между релятивистской массой и полной энергией. Решая эти задачи, студент должен усвоить, что законы классической механики имеют границу применимости и что они получаются как следствие теории относительности ( $c \rightarrow \infty$ ).

Задачи в контрольной работе расположены приблизительно в том порядке, в каком соответствующие вопросы рассматриваются в рабочей программе.

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Скорость мгновенная

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad \text{или} \quad v = \frac{ds}{dt}$$

Ускорение:

мгновенное

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

тангенциальное

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

нормальное

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

полное

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$$

Скорость угловая

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

То же, для равномерного вращательного движения

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

Ускорение угловое

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

Уравнения равнопеременного вращательного движения

$$\omega = \omega_0 + \epsilon t$$

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

$$s = \varphi r, \quad v = \omega r$$

$$a_t = \epsilon r, \quad a_n = \omega^2 r$$

Связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими движение точки по окружности

Второй закон Ньютона для поступательного движения

То же, при  $m = \text{const}$

Количество движения материальной точки массы  $m$ , движущейся со скоростью  $\mathbf{v}$

Закон сохранения количества движения для изолированной системы тел

Сила трения (скольжения)

Скорости шаров массами  $m_1$  и  $m_2$  после удара:

абсолютно упругого центрального

$$u_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}$$

абсолютно неупругого

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Работа переменной силы на пути  $s$

$$A = \int_s F \cos \alpha ds$$

Мощность

$$N = \frac{dA}{dt} = Fv \cos \alpha$$

$$F = -k \Delta l$$

Сила гравитационного взаимодействия

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

Напряженность гравитационного поля Земли

$$E = \frac{GM}{(R_3 + h)^2}$$

Потенциал гравитационного поля Земли

$$\varphi = -\frac{GM}{R_3 + h}$$

Потенциальная энергия:

упругодеформированного тела (работа упругой силы)

гравитационного взаимодействия тела, находящегося в однородном поле тяжести

Кинетическая энергия тела

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{P^2}{2m}$$

Закон сохранения механической энергии

$$E = T + \Pi = \text{const}$$

$$J = mr^2$$

Моменты инерции некоторых тел массой  $m$ :

полого и сплошного цилиндров (или диска) радиуса  $R$  относительно оси вращения, совпадающей с осью цилиндра

$$J_{\text{пол}} = mR^2$$

$$J_{\text{спл}} = \frac{1}{2} mR^2$$

$$J_0 = \frac{2}{5} mR^2$$

шара радиуса  $R$  относительно оси вращения, проходящей через центр масс шара

$$J_0 = \frac{1}{12} ml^2$$

$$J = \frac{1}{3} ml^2$$

тонкого стержня длиной  $l$ , если ось вращения перпендикулярна стержню и проходит через центр масс стержня

то же, но ось вращения проходит через один из концов стержня тела относительно произвольной оси (теорема Штейнера)

Момент силы относительно оси вращения

Основное уравнение динамики вращательного движения

То же, при  $J = \text{const}$

Закон сохранения момента количества движения для изолированной системы

Кинетическая энергия вращающегося тела

Работа при вращательном движении

Зависимости длины тела и времени от скорости в релятивистской механике

Зависимость массы частицы от скорости  $v$ , сравнимой со скоростью света

Энергия покоя частицы

Полная энергия частицы, движущейся со скоростью  $v$ , сравнимой со скоростью света

Кинетическая энергия релятивистской частицы

Теорема сложения скоростей в теории относительности

#### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Движение тела массой 0,1 кг задано уравнением  $x=2t^3+t^2+t-1$ . Найти зависимость скорости и ускорения от времени. Вычислить силу, действующую на тело в конце первой секунды.

Дано:  $m=0,1$  кг;  $x=2t^3+t^2+t-1$ ;  $t=1$  с.

Найти:  $v$ ;  $a$ ;  $F$ .

Решение. Мгновенную скорость находим как производную от координаты по времени:

$$v=\frac{dx}{dt}, \quad v=6t^2+2t+1.$$

Мгновенное ускорение — это первая производная от скорости по времени:

$$a=\frac{dv}{dt}, \quad a=12t+2.$$

Сила, действующая на тело, определяется по второму закону Ньютона:  $F=ma$ , где  $a$ , согласно условию задачи, — ускорение в конце первой секунды. Тогда  $F=m(12t+2)$  при  $t=1$  с

$$F=0,1\text{ кг}(12+2) \text{ м/с}^2=1,4 \text{ Н.}$$

Ответ:  $v=6t^2+2t+1$ ;  $a=12t+2$ ;  $F=1,4$  Н.

2. Сплошной цилиндр массой 0,5 кг и радиусом 0,02 м вращается относительно оси, совпадающей с осью цилиндра по закону  $\varphi=12+8t-0,5t^2$ . На цилиндр действует сила, касательная к поверхности. Определить эту силу и тормозящий момент.

Дано:  $m=0,5$  кг;  $r=0,02$  м;  $\varphi=12+8t-0,5t^2$ .

Найти:  $F$ ;  $M$ .

$$\begin{aligned} T &= \frac{J\omega^2}{2} \\ dA &= M d\varphi \\ I &= l_0 \sqrt{1-v^2/c^2}, \\ t &= \frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ m &= \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ E_0 &= m_0 c^2 \\ E &= mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ T &= E - E_0 = \\ &= m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) \\ u' &= \frac{u+v}{1+uv/c^2} \end{aligned}$$

Решение. Цилиндр вращается относительно оси, совпадающей с его осью, по закону

$$\varphi=12+8t-0,5t^2.$$

Угловое ускорение определяется как вторая производная от угла поворота по времени:

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \text{ или } \varepsilon = \frac{d\omega}{dt},$$

где  $\omega$  — угловая скорость, равная первой производной от угла поворота по времени  $\omega = d\varphi/dt$ ;  $\varepsilon = \omega - \dot{\varphi}$ . Тогда  $\varepsilon = -1$  рад/с<sup>2</sup>. Момент силы относительно оси вращения

$$M=F \times r \text{ или } M=Fr \sin \alpha.$$

Сила действует касательно к поверхности, поэтому  $\sin \alpha = 1$ , тогда  $M=Fr$ , откуда

$$F = \frac{M}{r}. \quad (1)$$

Тормозящий момент можно определить из основного уравнения динамики вращательного движения:

$$M=J\varepsilon, \quad (2)$$

где  $J$  — момент инерции цилиндра относительно оси вращения. В данном случае ось вращения совпадает с осью цилиндра, поэтому

$$J=\frac{1}{2}mr^2; \quad M=\frac{1}{2} \cdot 0,5\text{ кг} \cdot (0,02\text{ м})^2 \cdot (-1\text{ рад/с}^2)=-1 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F=\frac{M}{r}; \quad F=\frac{-1 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м}}{0,02\text{ м}}=-0,005 \text{ Н.}$$

Ответ:  $F=-0,005$  Н;  $M=-1 \cdot 10^{-4}$  Н·м.

3. Тело длиной 1 м движется мимо наблюдателя со скоростью 0,8 с. Какой покажется наблюдателю его длина?

Дано:  $l_0=1$  м;  $v=0,8$  с.

Найти:  $l$ .

Решение. Зависимость длины тела от скорости в релятивистской механике выражается формулой

$$l=l_0 \sqrt{1-v^2/c^2}, \quad (1)$$

где  $l_0$  — длина покоящегося тела;  $v$  — скорость его движения;  $c$  — скорость света в вакууме. Подставляя в формулу (1) числовые значения, имеем

$$l=1 \text{ м} \sqrt{1-(0,8)^2}=0,6 \text{ м.}$$

Ответ:  $l=0,6$  м.

4. Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями: 1)  $v=0,5 \text{ с}$  и  $u=0,75 \text{ с}$ ; 2)  $v=c$  и  $u=0,75 \text{ с}$ . Найти их относительную скорость в первом и втором случаях.

**Дано:** 1)  $v=0,5 \text{ с}$ ;  $u=0,75 \text{ с}$ ; 2)  $v=c$ ;  $u=0,75 \text{ с}$ .

**Найти:**  $u'_1$ ;  $u'_2$ .

**Решение.** Согласно теореме сложения скоростей в теории относительности

$$u' = \frac{v+u}{1+vu/c^2},$$

где  $v$ ,  $u$  — скорости соответственно первой и второй частиц;  $u'$  — их относительная скорость;  $c$  — скорость света в вакууме. Для первого и второго случаев находим

$$u'_1 = \frac{0,5c + 0,75c}{1 + 0,5c \cdot 0,75c/c^2} = 0,91c;$$

$$u'_2 = \frac{c + 0,75c}{1 + 0,75c^2/c^2} = c.$$

**Ответ:**  $u'_1 = 0,91c$ ;  $u'_2 = c$ .

5. Молот массой 70 кг падает с высоты 5 м и ударяет по железному изделию, лежащему на наковальне. Масса наковальни вместе с изделием 1330 кг. Считая удар абсолютно неупругим, определить энергию, расходуемую на деформацию изделия. Систему молот — изделие — наковальня считать замкнутой.

**Дано:**  $m_1 = 70 \text{ кг}$ ;  $h = 5 \text{ м}$ ;  $m_2 = 1330 \text{ кг}$ .

**Найти:**  $E_d$ .

**Решение.** По условию задачи, система молот — изделие — наковальня считается замкнутой, а удар — неупругий. На основании закона сохранения энергии можно считать, что энергия, затраченная на деформацию изделия, равна разности значений механической энергии системы до и после удара.

Считаем, что во время удара изменяется только кинетическая энергия тел, т. е. незначительным перемещением тел по вертикали во время удара пренебрегаем. Тогда энергия деформации изделия

$$E_d = \frac{m_1 v^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) v'^2}{2}, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость молота в конце падения с высоты  $h$ ;  $v'$  — общая скорость всех тел системы после неупрогоудара. Скорость молота в конце падения с высоты  $h$  определяется без учета сопротивления воздуха и трения по формуле

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (2)$$

Общую скорость всех тел системы после неупрогоудара найдем, применив закон сохранения количества движения:

$$\sum_{i=1}^n m_i v_i = \text{const.} \quad (3)$$

Для рассматриваемой системы закон сохранения количества движения имеет вид  $m_1 v = (m_1 + m_2) v'$ , откуда

$$v' = \frac{m_1 v}{m_1 + m_2}. \quad (4)$$

Подставив в формулу (1) выражения (2) и (4), получим

$$E_d = m_1 g h \frac{m_2}{m_1 + m_2};$$

$$E_d = 70 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ м} \frac{1330 \text{ кг}}{1330 \text{ кг} + 70 \text{ кг}}.$$

Вычислим на калькуляторе выражение  $70 \cdot 9,8 \cdot 5 \cdot \frac{1330}{1330 + 70}$  по программе

$$70 \quad [x] \quad 9,8 \quad [x] \quad 5 \quad [x] \quad 1330 \quad [=] \quad [x \rightarrow \Pi] \quad 1330 \quad [+] \quad 70 \quad [=] \quad [F]$$

$$[x \rightarrow \Pi] \quad [\div] \quad [\Pi \rightarrow x] \quad [=] \quad 3258,5$$

**Ответ:**  $E_d = 3258 \text{ Дж}$ .

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

**Дано:**  $m_1 = 1 \text{ кг}$ ;  $m_2 = 4 \text{ кг}$ ;  $v_1 = 0$ .

**Найти:**  $T_2/T_1$ .

**Решение.** Поскольку удар абсолютно упругий, выполняется закон сохранения энергии:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (1)$$

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  $\Delta T_2 = T_2$ , где  $T_2$  — кинетическая энергия второго тела после удара. По определению,

$$T_2 = \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad T_1 = \frac{m_1 u_1^2}{2}.$$

Так как удар центральный, то выполняется закон сохранения импульса

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2. \quad (2)$$

Поскольку  $v_2 = 0$ , выражения (1) и (2) примут вид

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), определим

$$u_2 = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2}.$$

Кинетическая энергия второго тела после удара

$$T_2 = \frac{m_2 u_2^2}{2} = \frac{2m_2 m_1^2 v_1^2}{(m_1 + m_2)^2}.$$

Определим часть энергии, которую передаст первое тело при ударе:

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}; \\ \frac{T_2}{T_1} &= \frac{4 \cdot 1 \text{ кг} \cdot 4 \text{ кг}}{(1 \text{ кг} + 4 \text{ кг})^2} = 0,64. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $T_2/T_1 = 0,64$ .

7. Тело массой 1 кг под действием постоянной силы движется прямолинейно. Зависимость пути, пройденного телом, от времени задана уравнением  $s = 2t^2 + 4t + 1$ . Определить работу силы за 10 с от начала ее действия и зависимость кинетической энергии от времени.

**Дано:**  $m = 1 \text{ кг}$ ;  $s = 2t^2 + 4t + 1$ ;  $t = 10 \text{ с}$ .

**Найти:**  $A$ ;  $T$ .

**Решение.** Работа, совершающаяся силой,

$$A = \int F ds. \quad (1)$$

Сила, действующая на тело, по второму закону Ньютона равна

$$F = ma \text{ или } F = m \frac{d^2s}{dt^2}. \quad (2)$$

Мгновенное ускорение определяется первой производной от скорости по времени или второй производной от пути по времени. В соответствии с этим

$$v = \frac{ds}{dt} = 4t + 4, \quad (3) \quad a = \frac{d^2s}{dt^2} = 4 \text{ м/с}^2. \quad (4)$$

Тогда

$$F = m \frac{d^2s}{dt^2} = 4m. \quad (5)$$

Из выражения (3) находим

$$ds = (4t + 4) dt. \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в уравнение (1), получим

$$A = \int 4m (4t + 4) dt.$$

По этой формуле вычислим работу, совершаемую силой за 10 с с начала ее действия:

$$\begin{aligned} A &= \int_0^{10} (16mt + 16m) dt = m \left[ \frac{16t^2}{2} + 16t \right]_0^{10} = \\ &= 1 \cdot (8 \cdot 100 + 16 \cdot 10) \text{ Дж} = 960 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия равна

$$T = \frac{mv^2}{2}. \quad (7)$$

Подставляя (3) в (7), имеем

$$T = \frac{m(4t + 4)^2}{2} = m(8t^2 + 16t + 8).$$

**Ответ:**  $A = 960 \text{ Дж}$ ;  $T = m(8t^2 + 16t + 8)$ .

8. Нейтрон движется со скоростью 0,6 с. Найти количество движения и кинетическую энергию нейтрона.

**Дано:**  $v = 0,6 \text{ с}$ ;  $m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

**Найти:**  $p$ ;  $T$ .

**Решение.** Количество движения нейтрона

$$p = mv. \quad (1)$$

Так как скорость нейтрона сравнима со скоростью света, то необходимо учесть зависимость массы от скорости, воспользовавшись релятивистским выражением для массы:

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

где  $m$  — масса движущегося нейтрона;  $m_0$  — масса покоя;  $v$  — скорость нейтрона;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света в вакууме;  $\beta = v/c$  — скорость нейтрона, выраженная в долях скорости света.

Подставляя уравнение (2) в (1) и учитывая, что  $v = \beta c$ , получаем

$$\begin{aligned} p &= \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ p &= \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 0,6 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{\sqrt{1 - (0,6)^2}} = 3,75 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}. \end{aligned}$$

В релятивистской механике кинетическая энергия частицы определяется как разность между полной энергией  $E$  и энергией покоя  $E_0$  этой частицы:

$$T = E - E_0, \quad (3)$$

где  $E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = m_0 c^2$ . Вычислим энергию покоя нейтрона:

$$E_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}.$$

Тогда [см. (3)]

$$T = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right);$$

$$T = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (0,6)^2}} - 1 \right) = 0,37 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $p = 3,75 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}; T = 0,37 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$

9. Какую скорость нужно сообщить ракете, чтобы она, стартовав с Земли, не вернулась на Землю? Сопротивление атмосферы не учитывать.

**Дано:**  $R_s = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}; g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2; R \rightarrow \infty$ .

**Найти:**  $v_0$ .

**Решение.** С удалением ракеты от Земли будет увеличиваться ее потенциальная энергия и уменьшаться кинетическая. По закону сохранения энергии,

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = m \left( \frac{GM}{R_s} - \frac{GM}{R} \right), \quad (1)$$

где  $m$  — масса ракеты;  $M$  — масса Земли;  $G$  — гравитационная постоянная;  $v_0$  и  $v$  — скорости ракеты относительно Земли в начальный и рассматриваемый моменты;  $R_s$  и  $R$  — расстояния от центра Земли до ракеты в начальный и рассматриваемый моменты;  $-GM/R$  — потенциал гравитационного поля Земли на расстоянии  $R$  от ее центра. После преобразования уравнения (1) имеем  $v_0^2 - v^2 = 2GM(1/R_s - 1/R)$ .

Ракета не вернется на Землю, если ее скорость  $v$  будет в бесконечности равна нулю, т. е.  $v = 0$  при  $R \rightarrow \infty$ . В этом случае

$$v_0^2 = 2GM/R_s. \quad (2)$$

Из закона всемирного тяготения следует, что на поверхности Земли  $GmM/R_s^2 = mg$ , откуда

$$GM = gR_s^2, \quad (3)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения. Подставим (2) в (3):

$$v_0^2 = 2gR_s \text{ или } v_0 = \sqrt{2gR_s}.$$

Считая, что ракета приобретает нужную скорость  $v_0$  уже вблизи поверхности Земли, находим

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,8 \text{ м}/\text{с}^2 \cdot 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}} = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м}/\text{с} = 11,2 \text{ км}/\text{с}.$$

Такая скорость необходима для преодоления гравитационного поля Земли. Она называется второй космической или параболической скоростью.

**Ответ:**  $v_0 = 11,2 \text{ км}/\text{с.}$

10. Тонкий стержень массой 300 г и длиной 50 см вращается с угловой скоростью  $10 \text{ с}^{-1}$  в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через середину стержня. Найти

угловую скорость, если в процессе вращения в той же плоскости стержень переместится так, что ось вращения пройдет через конец стержня.

**Дано:**  $m = 0,3 \text{ кг}; l = 0,5 \text{ м}; \omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}$ .

**Найти:**  $\omega_2$ .

**Решение.** Используем закон сохранения момента количества движения:

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

где  $J_i$  — момент инерции стержня относительно оси.

Для изолированной системы тел векторная сумма моментов количества движения остается постоянной. В данной задаче, вследствие того, что распределение массы стержня относительно оси изменяется, момент инерции стержня также изменится. В соответствии с (1) запишем

$$J_0 \omega_1 = J_2 \omega_2. \quad (2)$$

Известно, что момент инерции стержня относительно оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной стержню, равен

$$J_0 = \frac{1}{12} ml^2. \quad (3)$$

По теореме Штейнера,  $J = J_0 + md^2$ , где  $J$  — момент инерции относительно оси, проходящей через конец стержня;  $d$  — расстояние от центра масс до выбранной оси вращения.

Найдем момент инерции относительно оси, проходящей через его конец и перпендикулярной стержню:

$$J_2 = J_0 + md^2, \quad J_2 = \frac{ml^2}{12} + \frac{ml^2}{4} = \frac{ml^2}{3}. \quad (4)$$

Подставим формулу (3) и (4) в (2):  $ml^2 \omega_1 / 12 = ml^2 \omega_2 / 3$ , откуда

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{4}, \quad \omega_2 = \frac{10 \text{ с}^{-1}}{4} = 2,5 \text{ с}^{-1}.$$

**Ответ:**  $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ .

11. Диск массой 2 кг, радиусом 10 см вращается вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр с частотой 600 мин<sup>-1</sup>. Через 20 с под действием тормозящего момента диск остановился. Считая массу диска равномерно распределенной, найти тормозящий момент и число оборотов, которое сделает диск до полной остановки.

**Дано:**  $\omega = 0; m = 2 \text{ кг}; n = 600 \text{ мин}^{-1} = 10 \text{ с}^{-1}; \Delta t = 20 \text{ с}; R = 0,1 \text{ м}$ .

**Найти:**  $M; N$ .

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

$$J\Delta\omega = M\Delta t, \quad (1)$$

где  $J$  — момент инерции диска относительно оси, проходящей через 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, так как конечная угловая скорость  $\omega = 0$ . Выразим начальную угловую скорость через частоту вращения диска, тогда  $\omega_0 = 2\pi n$  и  $\Delta\omega = -2\pi n$ . Момент инерции диска  $J = mR^2/2$ , где  $m$  — масса диска;  $R$  — его радиус. Тогда формула (1) примет вид  $-2\pi nmR^2/2 = M\Delta t$ , откуда

$$\begin{aligned} M &= -\pi nmR^2/\Delta t, \quad M = -3,14 \cdot 10 \text{ с}^{-1} \cdot 2 \text{ кг} \cdot 0,01 \text{ м}^2/20 \text{ с} = \\ &= -3,1 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Угол поворота, т. е. угловой путь  $\varphi$ , за время вращения диска до остановки может быть определен по формуле для равнозаделенного вращения:

$$\varphi = \omega_0\Delta t - \varepsilon\Delta t^2/2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — угловое ускорение. По условию задачи,  $\omega = \omega_0 - \varepsilon\Delta t$ ,  $\omega = 0$ ,  $\varepsilon\Delta t = \omega_0$ . Тогда [см. (2)]

$$\varphi = \omega_0\Delta t - \omega_0\Delta t/2 = \omega_0\Delta t/2.$$

Так как  $\varphi = 2\pi N$ ,  $\omega_0 = 2\pi n$ , то число полных оборотов

$$N = n\Delta t/2; \quad N = 10 \text{ с}^{-1} \cdot 20 \text{ с}/2 = 100.$$

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

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

1 (1). При прямолинейном движении тела массой 1 кг изменение его координаты со временем происходит по закону  $x = 5t - 10t^2$ . Найти силу, действующую на тело.

2 (2). Определить силу, действующую на тело через 3 с после начала действия, и скорость в конце третьей секунды, если тело массой 3 кг движется с ускорением, изменяющимся по закону  $a = 10t - 10$ ;  $v_0 = 0$ .

3 (3). По условию предыдущей задачи определить силу, действующую на тело через 5 с после начала действия, и путь, пройденный телом за это время.

4 (4). Тело движется прямолинейно под действием постоянной силы 15 Н. Зависимость координаты от времени имеет вид  $x = 10 - 5t + 2t^2$ . Найти массу тела.

5 (5). Найти зависимость скорости от времени и силу, действующую на тело массой 0,1 кг в конце третьей секунды, если координата со временем изменяется по закону  $x = 2t - t^2 + 3t^3$ .

6 (6). Материальная точка движется по окружности радиусом 1 м согласно уравнению  $s = 8t - 0,2t^3$ . Найти скорость, тангенциальное, нормальное и полное ускорение в момент времени 2 с.

7 (7). Сплошной шарик массой 400 г и радиусом 5 см вращается вокруг оси, проходящей через его центр. Закон вращения шара имеет вид  $\varphi = 4 + 2t - 2t^2$ . Определить тормозящий момент.

8 (8). Стержень массой 1 кг и длиной 1 м вращается вокруг оси, проходящей через один из его концов по закону  $\varphi = 2 + t + t^2$ . Определить момент силы, действующей на другой его конец.

9 (9). Сплошной диск массой 0,2 кг вращается вокруг оси, проходящей через его центр масс под действием момента сил  $0,8 \cdot 10^{-2}$  Н·м. Закон вращения имеет вид  $\varphi = 5 - t + 2t^2$ . Определить радиус диска.

10 (10). Полый цилиндр вращается относительно оси, совпадающей с осью цилиндра. Закон вращения имеет вид  $\varphi = 10 - 5t + 0,5t^2$ . Определить момент инерции и массу цилиндра, если его радиус 0,05 м. Момент силы относительно оси вращения, действующий на цилиндр, 0,75 Н·м.

11 (11). Стержень движется в продольном направлении с постоянной скоростью относительно инерциальной системы отсчета. При каком значении скорости длина стержня в этой системе отсчета будет на 1% меньше длины покоящегося стержня?

12 (12).  $\pi$ -мезон — нестабильная частица. Собственное время жизни его  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с. Какое расстояние пролетит  $\pi$ -мезон до распада, если он движется со скоростью 0,99 с?

13 (13). По условию предыдущей задачи определить, на сколько расстояние, пролетаемое  $\pi$ -мезоном, при релятивистском замедлении времени больше, чем если бы такого замедления не было.

14 (14). Какую скорость должно иметь движущееся тело, чтобы его продольные размеры уменьшились в два раза?

15 (15). При какой относительной скорости движения релятивистское сокращение длины движущегося тела составит 50%?

16 (16). Радиоактивное ядро, вылетевшее из ускорителя со скоростью 0,4 с, выбросило в направлении своего движения  $\beta$ -частицу со скоростью 0,75 с относительно ускорителя. Найти скорость частицы относительно ядра.

17 (17). Найти собственное время жизни нестабильной частицы  $\mu$ -мезона, движущегося со скоростью 0,99 с, если расстояние, пролетаемое им до распада, равно примерно 10 км.

18 (18). Собственное время жизни  $\pi$ -мезона  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с. Чему равно время жизни  $\pi$ -мезона для наблюдателя, относительно которого эта частица движется со скоростью 0,95 с?

19 (19). Электрон, скорость которого 0,97 с, движется на встречу протону, имеющему скорость 0,5 с. Определить скорость их относительного движения.

20 (20). Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями 0,9 с. Определить скорость их относительного движения.

**21.** Скорости двух центрально соударяющихся шаров до их взаимодействия равны 0,1 и 0,05 м/с, их массы соответственно равны 4 и 3 кг. Определить их скорости после удара при упругом соударении.

**22.** В каком случае двигатель автомобиля совершил большую работу (во сколько раз): для разгона с места до скорости 36 км/ч или при увеличении скорости от 36 до 72 км/ч. Силу сопротивления и время движения в обоих случаях считать одинаковыми.

**23.** Шар массой 4 кг движется со скоростью 2 м/с и сталкивается с покоящимся шаром массой 1 кг. Вычислить работу, совершенную вследствие деформации шаров при прямом центральном ударе. Шары считать неупругими.

**24.** Тепловоз массой 40 т, двигаясь со скоростью 1 м/с, удаляется в два неподвижных пружинных буфера вагона. Найти наибольшее сжатие буферов вагона, если жесткость пружины  $5 \cdot 10^6$  Н/м.

**25.** Автомобиль массой 5 т движется равнозамедленно при торможении, при этом в течение десяти секунд его скорость уменьшается от 72 км/ч до 54 км/ч. Найти силу торможения.

**26.** Протон ударяется о неподвижное ядро атома кремния. Считая удар центральным и упругим, найти, во сколько раз уменьшится кинетическая энергия протона при ударе.

**27.** Для того чтобы растянуть пружину на 2 см, требуется приложить силу 40 Н. Какая работа совершается при сжатии пружины на 5 см?

**28.** На тело действует сила  $F = kx^2$ . На сколько увеличится потенциальная энергия тела при его перемещении из точки  $x=0$  в точку  $x=5$  см?

**29.** Стальная цепочка длиной 0,5 м, лежащая на столе, начинает скользить, если 8 см этой цепочки спущены со стола. Масса цепочки 3 кг, коэффициент трения между столом и цепочкой 0,1. Какая работа против сил трения совершается при соскальзывании всей цепочки?

**30.** Тело массой 1 кг под действием постоянной силы движется по прямолинейно. Зависимость пути, пройденного телом, от времени выражается уравнением  $s = t^2 + 2t + 2$ . Определить работу силы за 5 с после начала ее действия.

**31.** Масса движущегося протона  $2,25 \cdot 10^{-27}$  кг. Найти скорость и кинетическую энергию протона.

**32.** Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов 100 МВ. Во сколько раз его релятивистская масса больше массы покоя? Чему равна скорость электрона?

**33.** Определить скорость протона, если его релятивистская масса в три раза больше массы покоя. Вычислить кинетическую и полную энергии.

**34.** Вычислить скорость, полную и кинетическую энергию протона в тот момент, когда его масса равна массе  $\alpha$ -частицы.

**35.** Найти импульс, полную и кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью, равной 0,7 с.

**36.** Протон и  $\alpha$ -частица проходят одинаковую ускоряющую разность потенциалов, после чего масса протона составила половину массы  $\alpha$ -частицы. Определить разность потенциалов.

**37.** Определить соотношение между полной энергией  $E$ , энергией покоя  $E_0$  и импульсом  $p$  релятивистской частицы.

**38.** Вывести соотношение между полной энергией, массой покоя и импульсом релятивистской частицы.

**39.** С какой скоростью движется электрон, если его кинетическая энергия 1,78 МэВ? Определить импульс электрона.

**40.** Кинетическая энергия частицы оказалась равной ее энергии покоя. Какова скорость этой частицы?

**41.** На каком расстоянии от центра Земли находится точка, в которой напряженность суммарного гравитационного поля Земли и Луны равна нулю? Принять, что масса Земли в 81 раз больше массы Луны и расстояние от центра Земли до центра Луны равно 60 радиусам Земли.

**42.** С какой скоростью упадет на поверхность Луны метеорит, скорость которого вдали от Луны мала? Атмосфера на Луне отсутствует.

**43.** Какую работу необходимо совершить, чтобы вывести тело массой 250 кг на орбиту искусственной планеты солнечной системы с поверхности Земли?

**44.** Определить работу, которую совершают силы гравитационного поля Земли, если тело массой 2 кг упадет на поверхность Земли с высоты, равной радиусу Земли.

**45.** По условию предыдущей задачи определить работу, совершаемую силами гравитационного поля Земли, если тело падает на поверхность Земли из бесконечности.

**46.** Ракета была запущена с Земли с начальной скоростью 10 км/с. Определить скорость ракеты на орбите, предположив, что орбита круговая и ее радиус равен двум радиусам Земли. Сопротивление воздуха не учитывать.

**47.** Вычислить первую и вторую космические скорости тела, запущенного с Земли.

**48.** Вычислить первую и вторую космические скорости тела, запущенного с Луны.

**49.** На какой высоте над поверхностью Земли напряженность гравитационного поля 0,5 Н/кг? Определить потенциал поля тяготения на этой высоте.

**50.** Как изменяется напряженность и потенциал гравитационного поля Земли на высоте, равной радиусу Земли? Принять ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли равным 9,8 м/с<sup>2</sup>.

**51 (21).** Стержень массой 2 кг и длиной 1 м может вращаться вокруг оси, проходящей через его середину перпендикулярно стержню. В конец стержня попадает пуля массой 10 г, летящая перпендикулярно оси и стержню со скоростью 500 м/с. Определить угловую скорость, с которой начнет вращаться стержень, если пуля застрянет в нем.

**52 (22).** Два горизонтально вращающихся один над другим диска расположены так, что плоскости их параллельны, а центры лежат на одной вертикали. Угловая скорость и момент инерции первого диска равны  $10 \text{ рад/с}$  и  $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , а второго — соответственно  $5 \text{ рад/с}$  и  $4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Первый диск падает на второй и система вращается как единое целое. Определить угловую скорость вращающейся системы и изменение кинетической энергии дисков после падения первого на второй.

**53 (23).** Сплошной цилиндр массой  $10 \text{ кг}$  катится без скольжения с постоянной скоростью  $10 \text{ м/с}$ . Определить кинетическую энергию цилиндра и время до его остановки, если на него подействует сила  $50 \text{ Н}$ .

**54 (24).** Сплошной шар скатывается по наклонной плоскости, длина которой  $10 \text{ м}$  и угол наклона  $30^\circ$ . Определить скорость шара в конце наклонной плоскости.

**55 (25).** Полый цилиндр массой  $2 \text{ кг}$  катится по горизонтальной поверхности со скоростью  $20 \text{ м/с}$ . Определить силу, которую необходимо приложить к цилиндру, чтобы остановить его на пути  $1,6 \text{ м}$ .

**56 (26).** Маховик, имеющий форму диска массой  $30 \text{ кг}$  и радиусом  $10 \text{ см}$ , был раскручен до частоты  $300 \text{ мин}^{-1}$ . Под действием силы трения диск остановился через  $20 \text{ с}$ . Найти момент сопротивления равный  $0,2$  веса шара? Чему равно время подъема?

**57 (27).** Какой скоростью должен обладать шар, катящийся без скольжения, чтобы подняться по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол  $30^\circ$ , на высоту  $2 \text{ м}$ , если сила сопротивления равна  $0,2$  веса шара? Чему равно время подъема?

**58 (28).** По условию предыдущей задачи определить, с какой скоростью и в течение какого времени шар скатится обратно.

**59 (29).** Сначала диск, а потом обруч скатываются с наклонной плоскости, составляющей угол  $30^\circ$  с горизонтом. Чему равны их ускорения?

**60 (30).** Шар и сплошной цилиндр имеют одинаковую массу ( $5 \text{ кг}$  каждый) и катятся с одинаковой скоростью  $10 \text{ м/с}$ . Найти кинетические энергии этих тел.

## II. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

### ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

Приступая к изучению раздела «Основы молекулярной физики и термодинамики», студенты должны уяснить, что существуют два качественно различных и взаимодополняющих метода исследования физических свойств микроскопических систем — статистический (молекулярно-кинетический) и термодинамический. Молекулярно-кинетический метод исследования лежит в основе молекулярной физики, термодинамический — в основе термодинамики. Молекулярно-кинетическая теория является важнейшей теорией, которая позволяет с единой точки зрения рассмотреть самые различные явления во всех состояниях вещества, вскрыть физическую сущность этих явлений и теоретическим

путем вывести многочисленные закономерности, открытые экспериментально и имеющие большое практическое значение.

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

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

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

Контрольная работа № 2 построена так, что позволяет проверить знания студентов по основным вопросам данного раздела.

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

Задачи по теме «Основы термодинамики» охватывают такие важные соотношения и понятия, как первое начало термодинамики, внутренняя энергия, работа при различных изопроцессах и адабатном процессе. Включены также задачи, которые позволяют изучить и понять такие вопросы, как цикл Карно, теплоты являются функцией состояния.

### ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Количество вещества

Уравнение Клапейрона — Менделеева (уравнение состояния идеального газа)

Закон Дальтона

Концентрация молекул

Уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$v = N/N_A \text{ или } v = m/M$$

$$pV = (m/M)RT$$

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

$$n = N/V = N_A \rho / M$$

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{\text{кин}}^2 \rangle =$$

$$= \frac{2}{3} n \langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle = nkT$$

Средняя кинетическая энергия молекулы

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$$

Внутренняя энергия идеального газа

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

Скорости молекул:

средняя квадратичная

$$\langle v_{\text{кин}} \rangle = \sqrt{3kT/m_0} =$$

$$= \sqrt{3RT/M}$$

средняя арифметическая

$$\langle v \rangle = \sqrt{8kT/(\pi m_0)} =$$

$$= \sqrt{8RT/(\pi M)}$$

наиболее вероятная  
Средняя длина свободного пробега молекулы  
Среднее число соударений молекулы за 1 с  
Распределение молекул в потенциальном поле сил (распределение Больцмана)

Барометрическая формула

Уравнение диффузии (закон Фика)

Сила внутреннего трения в жидкости (газе)

Уравнение теплопроводности

Коэффициент диффузии  
Динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения)

Теплопроводность

Уравнение Майера

Теплоемкость молярная:

изохорная

изобарная

Первое начало термодинамики

Работа расширения газа при процессе:

адиабатном

изобарном

изотермическом

$$\begin{aligned} v_b &= \sqrt{\frac{2kT/m_0}{\pi}} = \\ &= \sqrt{\frac{2RT/M}{\pi}} \\ \langle \lambda \rangle &= (\sqrt{2\pi d^3 n})^{-1} \\ \langle z \rangle &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\pi d^2 n \langle v \rangle}{M} \\ n &= n_0 \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \\ p &= p_0 \exp\left(-\frac{mg h}{kT}\right) \\ dm &= -D \frac{dc}{dx} S dt \\ F &= -\eta \frac{dv}{dx} S \\ dQ &= -\lambda \frac{dT}{dx} S dt \\ D &= 1/3 \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \\ \eta &= 1/3 \langle v \rangle \langle \lambda \rangle = D_p \\ \lambda &= 1/3 c_v \langle v \rangle \langle \lambda \rangle = \eta c_v \\ C_p - C_v &= R \\ C_v &= \frac{i}{2} R \quad C_v = c_v M \\ C_p &= \frac{(i+2)}{2} R \quad C_p = c_p M \\ dQ &= dU + dA \\ dU &= (m/M) C_v dT, \quad dA = p dV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{m}{M} C_p (T_2 - T_1) = \\ &= \frac{m}{M} \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} \times \\ &\times \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \\ &= \frac{p_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] \\ A &= p (V_2 - V_1) = \\ &= \frac{m}{M} R (T_2 - T_1) \\ A &= \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \end{aligned}$$

Уравнения Пуассона, связывающие параметры идеального газа при адиабатном процессе

Коэффициент полезного действия цикла Карно

Изменение энтропии

$$\begin{aligned} &= \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \\ pV^\gamma &= \text{const}, \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}, \\ T^\gamma p^{1-\gamma} &= \text{const} \\ \eta &= \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T} \\ \Delta S &= S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \end{aligned}$$

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. В сосуде объемом 3 м<sup>3</sup> находится смесь 7 кг азота и 2 кг водорода при температуре 27°C. Определить давление и молярную массу смеси газов.

Дано:  $V = 3 \text{ м}^3$ ;  $m_1 = 7 \text{ кг}$ ;  $M_1 = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ;  $m_2 = 2 \text{ кг}$ ;  $M_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ .

Найти:  $p$ ;  $M$ .

Решение. Воспользуемся уравнением Клапейрона — Менделеева, применив его к азоту и водороду:

$$p_1 V = (m_1 / M_1) RT, \quad (1) \quad p_2 V = (m_2 / M_2) RT, \quad (2)$$

где  $p_1$  — парциальное давление азота;  $m_1$  — масса азота;  $M_1$  — его молярная масса;  $V$  — объем сосуда;  $T$  — температура газа;  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$  — молярная газовая постоянная;  $p_2$  — парциальное давление водорода;  $m_2$  — масса водорода;  $M_2$  — его молярная масса. Под парциальным давлением  $p_1$  и  $p_2$  понимается то давление, которое производил бы газ, если бы он только один находился в сосуде. По закону Далтона, давление смеси равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав смеси:

$$p = p_1 + p_2. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (2) выразим  $p_1$  и  $p_2$  и подставим в уравнение (3):

$$p = \frac{m_1 RT}{M_1 V} + \frac{m_2 RT}{M_2 V} = \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{RT}{V}. \quad (4)$$

Найдем молярную массу смеси газов по формуле

$$M = \frac{m_1 + m_2}{v_1 + v_2}, \quad (5)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — число молей азота и водорода соответственно. Число молей газов найдем по формулам

$$v_1 = m_1 / M_1, \quad (6) \quad v_2 = m_2 / M_2. \quad (7)$$



Подставляя в (4) выражения (5), (6) и (7), находим

$$Z = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{8RT/(\pi M)} \sqrt{2\pi d^2 p}}{kT} \frac{pV}{kT} = \frac{2\pi d^2 p^2 V}{(kT)^2} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}};$$

$$Z = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м})^2 \cdot (10^4 \text{ Па})^2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К} \cdot 300 \text{ К})^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 300 \text{ К}}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}}} = 1,21 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-1};$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К} \cdot 300 \text{ К}}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м})^2 \cdot 10^4 \text{ Па}} = 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Ответ:  $Z = 1,21 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-1}$ ;  $\langle \lambda \rangle = 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

4. Определить коэффициенты диффузии и внутреннего трения гелия, находящегося при температуре  $T = 200 \text{ К}$  и давлении  $p = 10^4 \text{ Па.}$

Дано:  $M = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$ ;  $T = 200 \text{ К}$ ;  $p = 1 \cdot 10^4 \text{ Па}$ ;  $d = 1,9 \times 10^{-10} \text{ м.}$

Найти:  $D$ ;  $\eta$ .

Решение. Коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle, \quad (1)$$

где  $\langle v \rangle$  — средняя арифметическая скорость молекул, равная  $\langle v \rangle = \sqrt{8RT/(\pi M)}$ ,

$\langle \lambda \rangle$  — средняя длина свободного пробега молекул. Для нахождения  $\langle \lambda \rangle$  воспользуемся формулой, взятой из решения примера 3:

$$\langle \lambda \rangle = kT/(\sqrt{2}\pi d^2 p). \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), имеем

$$D = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} = \frac{2kT}{3\pi d^2 p} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}}. \quad (4)$$

Коэффициент внутреннего трения

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho, \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность газа при температуре 200 К и давлении  $10^4 \text{ Па}$ . Для нахождения  $\rho$  воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (6)$$

Учитывая, что  $\rho = m/V$ , имеем

$$\rho = pM/(RT). \quad (7)$$

Коэффициент внутреннего трения газа может быть выражен через коэффициент диффузии [см. (1) и (5)]:

$$\eta = D\rho = DpM/(RT). \quad (8)$$

Подставляя числовые значения в (4) и (8), получаем

$$D = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К} \cdot 200 \text{ К}}{3 \cdot 3,14 \cdot (1,9 \cdot 10^{-10} \text{ м})^2 \cdot 10^4 \text{ Па}} \sqrt{\frac{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 200 \text{ К}}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}}} = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{s};$$

$$\eta = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{s} \frac{10^4 \text{ Па} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}}{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 200 \text{ К}} = 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}).$$

Ответ:  $D = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{s}$ ;  $\eta = 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

5. 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.

Дано:  $m = 320 \text{ г} = 32 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$ ;  $T_1 = 300 \text{ К}$ ;  $T_2 = 310 \text{ К}$ .

Найти:  $Q$ ;  $\Delta U$ ;  $A$ .

Решение. Количество теплоты, необходимое для нагревания газа при постоянном давлении,

$$Q = mc_p(T_2 - T_1) = \frac{m}{M} C_p(T_2 - T_1). \quad (1)$$

Здесь  $c_p$  и  $C_p = Mc_p$  — удельная и молярная теплоемкости газа при постоянном давлении;  $M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$  — молярная масса кислорода. Для всех двухатомных газов (с жесткой связью)

$$C_p = \frac{7}{2} R; \quad C_p = \frac{7}{2} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Изменение внутренней энергии газа

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_v(T_2 - T_1), \quad (2)$$

где  $C_v$  — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме. Для всех двухатомных газов (с жесткой связью)

$$C_v = \frac{5}{2} R; \quad C_v = \frac{5}{2} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = 20,8 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Работа расширения газа при изобарном процессе  $A = p\Delta V$ , где  $\Delta V = V_2 - V_1$  — изменение объема газа, которое можно найти из уравнения Клапейрона — Менделеева. При изобарном процессе

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1, \quad (3) \quad pV_2 = \frac{m}{M} RT_2. \quad (4)$$

Почленным вычитанием выражения (4) из (3) находим

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} \cdot R(T_2 - T_1),$$

следовательно,

$$A = \frac{m}{M} R (T_2 - T_1). \quad (5)$$

Подставляя числовые значения в формулы (1), (2) и (5), получаем:

$$Q = \frac{32 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 29,1 \text{ Дж/(моль·К)} \cdot (310 \text{ К} - 300 \text{ К}) = \\ = 2910 \text{ Дж};$$

$$\Delta U = \frac{32 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 20,8 \text{ Дж/(моль·К)} \cdot (310 \text{ К} - 300 \text{ К}) = \\ = 2080 \text{ Дж};$$

$$A = \frac{32 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль·К)} \cdot (310 \text{ К} - 300 \text{ К}) = 830 \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $Q=2910 \text{ Дж}; \Delta U=2080 \text{ Дж}; A=830 \text{ Дж.}$

6. 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) адиабатично?

**Дано:**  $V_1=10^{-3} \text{ м}^3$ ;  $V_2=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;  $p=0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $M=40 \times 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

**Найти:**  $\Delta U$ .

**Решение.** Применим первый закон термодинамики. Согласно этому закону, количество теплоты  $Q$ , переданное системе, расходуется на увеличение внутренней энергии  $\Delta U$  и на внешнюю механическую работу  $A$ :

$$Q = \Delta U + A, \quad (1)$$

где

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_v \Delta T. \quad (2)$$

Здесь  $m$  — масса газа,  $C_v$  — молярная изохорная теплоемкость:

$$C_v = \frac{i}{2} R, \quad (3)$$

где  $i$  — число степеней свободы. Тогда выражение (2) примет вид

$$\Delta U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R \Delta T. \quad (4)$$

Запишем уравнение Клапейрона — Менделеева для начального и конечного состояний газа при изобарном процессе  $pV_1 = \frac{m}{M} RT_1$

и  $pV_2 = \frac{m}{M} RT_2$  или

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1). \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$\Delta U = \frac{i}{2} p(V_2 - V_1). \quad (6)$$

При адиабатном расширении газа теплообмена с внешней средой не происходит, поэтому  $Q=0$ . Уравнение (1) запишем в виде

$$\Delta U + A = 0. \quad (7)$$

Это соотношение устанавливает, что работа расширения газа может быть произведена только за счет уменьшения внутренней энергии газа (знак минус перед  $\Delta U$ ):

$$A = -\Delta U. \quad (8)$$

Работа, совершаемая газом при адиабатном процессе,

$$A = -\frac{p_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right], \quad (9)$$

где  $\gamma = C_p/C_v = (i+2)/i$  — показатель степени адиабаты. Для аргона — одноатомного газа ( $i=3$ ) — имеем  $\gamma=1,67$ .

Найдем изменение внутренней энергии при адиабатном процессе для аргона, учитывая формулы (8) и (9):

$$\Delta U = -\frac{p_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right]. \quad (10)$$

Подставляя числовые значения в (6) и (10), получаем:

а) при изобарном расширении

$$\Delta U = -\frac{3}{2} \cdot 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 10^{-3} \text{ м}^3) = 120 \text{ Дж};$$

б) при адиабатном расширении

$$\Delta U = -\frac{0,8 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{(1,67 - 1)} \left[ \left( \frac{10^{-3} \text{ м}^3}{2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} \right)^{1,67-1} - 1 \right] = -44,6 \text{ Дж.}$$

**Ответ:** а)  $\Delta U=120 \text{ Дж}$ ; б)  $\Delta U=-44,6 \text{ Дж}$ .

7. Температура нагревателя тепловой машины 450 К. Температура холодильника 300 К. Определить КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, и полную мощность машины, если нагреватель ежесекундно передает ей 1525 Дж теплоты.

**Дано:**  $T=450 \text{ К}$ ;  $T_0=300 \text{ К}$ ;  $Q=1525 \text{ Дж}$ ;  $t=1 \text{ с}$ .

**Найти:**  $\eta$ ;  $N$ .

**Решение.** КПД машины

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} \text{ или } \eta = \frac{A}{Q}. \quad (1)$$

Из выражения (1) находим

$$A = \eta Q = \left( \frac{T - T_0}{T} \right) Q.$$

Произведем вычисления:

$$\eta = \frac{450\text{K} - 300\text{K}}{450\text{K}} = 0,33; A = 0,33 \cdot 1525 \text{ Дж} = 508 \text{ Дж}.$$

Эта работа совершается за 1 с, следовательно, полная мощность машины

$$N = \frac{A}{t}; N = \frac{508 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 508 \text{ Вт.}$$

**Ответ:**  $\eta = 0,33$ ;  $N = 508 \text{ Вт.}$

8. Горячая вода некоторой массы отдает теплоту холодной воде такой же массы и температуры их становятся одинаковыми. Показать, что энтропия при этом увеличивается.

**Решение.** Пусть температура горячей воды  $T_1$ , холодной  $T_2$ , а температура смеси  $\Theta$ . Определим температуру смеси, исходя из уравнения теплового баланса:

$$mc(T_1 - \Theta) = mc(\Theta - T_2) \text{ или } T_1 - \Theta = \Theta - T_2,$$

откуда  $\Theta = \frac{T_1 + T_2}{2}$ . (1)

Изменение энтропии, происходящее при охлаждении горячей воды,

$$\Delta S_1 = \int_{T_1}^{\Theta} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{\Theta}{T_1}.$$

Изменение энтропии, происходящее при нагревании холодной воды,

$$\Delta S_2 = \int_{T_2}^{\Theta} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{\Theta}{T_2}.$$

Изменение энтропии системы

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{\Theta}{T_1} + cm \ln \frac{\Theta}{T_2} = cm \ln \frac{\Theta^2}{T_1 T_2}$$

или с учетом соотношения (1)

$$\Delta S = cm \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2},$$

так как  $(T_1 + T_2)^2 > 4T_1 T_2$ , то  $\Delta S > 0$ .

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

1. Какой объем при нормальных условиях занимает смесь 4 кг гелия и 4 кг азота?

2. В баллоне емкостью 5 л находится 2 кг водорода и 1 кг кислорода. Определить давление смеси, если температура окружающей среды 7°C.

3. В баллоне емкостью 10 л находится сжатый воздух при 27°C. После того как часть воздуха выпустили, давление понизилось на  $2 \cdot 10^5$  Па. Определить массу выпущенного воздуха. Процесс считать изотермическим.

4. В сосуде, имеющем форму шара, радиус которого 0,2 м, находится 80 г азота. До какой температуры можно нагреть сосуд, если его стеки выдерживают давление  $7 \cdot 10^5$  Па?

5. При какой температуре находится газ, если при нагревании его на 20°C при постоянном давлении объем увеличился в два раза? Для каких газов это возможно?

6. В баллоне под давлением 1 МПа находится газовая смесь из кислорода и азота. Считая, что масса азота составляет 80% от массы смеси, определить парциальное давление отдельных газов.

7. Какой объем при нормальных условиях занимает смесь 2 кг кислорода и 1 кг азота?

8. При температуре 27°C и давлении  $12 \cdot 10^5$  Па плотность смеси водорода и азота  $10 \text{ г/дм}^3$ . Определить молярную массу смеси.

9. До какой температуры нужно нагреть запаянный шар, содержащий 35 г воды, чтобы шар разорвался, если известно, что стеки шара выдерживают давление  $2 \cdot 10^7$  Па? Емкость шара 1 л.

10. В пустой сосуд емкостью 5 дм<sup>3</sup> впустили 3 дм<sup>3</sup> азота под давлением 250 кПа и 4 дм<sup>3</sup> водорода под давлением 50 кПа. Каково давление образованшейся смеси?

11 (31). Давление идеального газа 2 МПа, концентрация молекул  $2 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы и температуру газа.

12 (32). Определить среднюю полную кинетическую энергию одной молекулы неона, кислорода и водяного пара при температуре 500 К.

13 (33). Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа равна  $5 \cdot 10^{-21}$  Дж. Концентрация молекул  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Определить давление газа.

14 (34). Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы двухатомного газа, если суммарная кинетическая энергия молекул 1 кмоль этого газа 6,02 МДж.

15 (35). Сколько молекул водорода находится в сосуде емкостью 1 л, если средняя квадратичная скорость движения молекул 500 м/с, а давление на стеки сосуда 1 кПа?

16 (36). Найти среднюю кинетическую энергию вращательного движения всех молекул, содержащихся в 0,25 г водорода при температуре 27°C.

17 (37). Определить концентрацию молекул идеального газа при температуре 350 К и давлении 1,0 МПа.

**18 (38).** Определить температуру идеального газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул  $2,8 \cdot 10^{-19}$  Дж.

**19 (39).** В сосуде емкостью  $500 \text{ см}^3$  находится газ при температуре  $47^\circ\text{C}$ . Из-за утечки газа из колбы просочилось  $10^{21}$  молекул. На сколько снизилось давление газа в сосуде?

**20 (40).** Сколько молекул газа находится в сосуде емкостью  $2,0 \text{ л}$  при нормальных условиях?

**21.** Во сколько раз коэффициент диффузии молекул кислорода больше коэффициента диффузии молекул азота? Температура и давление газов одинаковые.

**22.** Сколько соударений в секунду в среднем испытывает молекула водорода, находящегося при нормальных условиях?

**23.** Определить коэффициент внутреннего трения углекислого газа при температуре  $200 \text{ К}$ .

**24.** Сосуд емкостью  $10 \text{ л}$  содержит водород массой  $20 \text{ г}$ . Определить среднее число соударений молекул в секунду, если температура газа  $300 \text{ К}$ .

**25.** Динамическая вязкость кислорода при нормальных условиях  $1,91 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ . Какова средняя длина свободного пробега молекул кислорода при этих условиях?

**26.** В сосуде емкостью  $1,0 \text{ л}$  находится  $8 \text{ г}$  кислорода. Определить среднюю длину свободного пробега молекул.

**27.** Определить среднюю длину свободного пробега молекул азота, если плотность разреженного газа  $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$ .

**28.** При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода равна  $1,25 \text{ м}$ , если температура газа  $47^\circ\text{C}$ ?

**29.** Вычислить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха при давлении  $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и температуре  $10^\circ\text{C}$ .

**30.** По условию предыдущей задачи вычислить коэффициент диффузии воздуха.

**31 (41).** При каком процессе выгоднее производить расширение углекислого газа — адиабатном или изотермическом, если объем увеличивается в два раза? Начальная температура в обоих случаях одинаковая.

**32 (42).** Найти работу и изменение внутренней энергии при адиабатном расширении  $0,5 \text{ кг}$  воздуха, если его объем увеличился в пять раз. Начальная температура  $17^\circ\text{C}$ .

**33 (43).** Определить количество теплоты, сообщенное  $14 \text{ г}$  азота, если он был изобарически нагрет от  $37$  до  $187^\circ\text{C}$ . Какую работу при этом совершил газ и как изменится его внутренняя энергия?

**34 (44).** Во сколько раз увеличится объем  $2 \text{ моль}$  водорода при изотермическом расширении при температуре  $27^\circ\text{C}$ , если при этом была затрачена теплота  $8 \text{ кДж}$ ?

**35 (45).** Водород, занимающий объем  $4 \text{ л}$  и находящийся под давлением  $10^5 \text{ Па}$ , адиабатно скат до объема  $1 \text{ л}$ . Найти работу сжатия и изменение внутренней энергии водорода.

**36 (46).** Газ, занимающий объем  $10 \text{ л}$  под давлением  $0,5 \text{ МПа}$ , был изобарно нагрет от  $323$  до  $473 \text{ К}$ . Найти работу расширения газа.

**37 (47).** При нагревании  $0,5 \text{ кмоль}$  азота было передано  $1000 \text{ Дж}$  теплоты. Определить работу расширения при постоянном давлении.

**38 (48).** Определить, какое количество теплоты необходимо сообщить углекислому газу массой  $440 \text{ г}$ , чтобы нагреть его на  $10 \text{ К}$ : а) изохорно; б) изобарно.

**39 (49).** Какое количество теплоты нужно сообщить  $1 \text{ моль}$  кислорода, чтобы он совершил работу  $10 \text{ Дж}$ : а) при изотермическом процессе; б) при изобарном?

**40 (50).** Азот массой  $1 \text{ кг}$ , находящийся при температуре  $300 \text{ К}$ , сжимают: а) изотермически; б) адиабатно, увеличивая давление в десять раз. Определить работу, затраченную на сжатие газа, в обоих случаях.

**41.** Какая часть теплоты, полученной от нагревателя, отдается холодильнику при прямом цикле Карно, если температура нагревателя  $500 \text{ К}$ , температура холодильника  $175 \text{ К}$ ?

**42.** Найти КПД цикла, состоящего из двух изобар и двух адиабат, если температуры характерных точек равны  $T_1=370 \text{ К}$ ,  $T_2=600 \text{ К}$ ,  $T_3=500 \text{ К}$ ,  $T_4=350 \text{ К}$ . Решение пояснить диаграммой  $p-V$ .

**43.** За счет  $1 \text{ кДж}$  теплоты, получаемого от нагревателя, машина, работающая по циклу Карно, совершает работу  $0,5 \text{ кДж}$ . Температура нагревателя  $500 \text{ К}$ . Определить температуру холодильника.

**44.** При прямом цикле Карно тепловая машина совершает работу  $200 \text{ Дж}$ . Температура нагревателя  $375 \text{ К}$ , холодильника  $300 \text{ К}$ . Определить количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя.

**45.** Определить, на сколько процентов изменится КПД прямого цикла Карно, если температура нагревателя  $894 \text{ К}$ , а температура холодильника уменьшилась от  $494$  до  $394 \text{ К}$ .

**46.** Совершая прямой цикл Карно, газ отдал холодильнику  $25\%$  теплоты, полученной от нагревателя. Определить температуру холодильника, если температура нагревателя  $500 \text{ К}$ .

**47.** Тепловая машина работает по циклу Карно, КПД которого  $0,2$ . Каким будет КПД этой машины, если она совершил тот же цикл в обратном направлении?

**48.** Холодильная машина работает по обратному циклу Карно, КПД которого  $300\%$ . Каков будет КПД тепловой машины, работающей по прямому циклу Карно?

**49.** Определить работу идеальной тепловой машины за один цикл, если она в течении цикла получает от нагревателя количество теплоты  $2095 \text{ Дж}$ . Температура нагревателя  $500 \text{ К}$ , холодильника  $300 \text{ К}$ .

**50.** Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно,  $480 \text{ К}$ , температура холодильника  $390 \text{ К}$ . Какой

должна быть температура нагревателя при неизменной температуре холодильника, чтобы КПД машины увеличился в два раза?

51 (51). При изобарном расширении водорода массой 20 г его объем увеличивается в три раза. Определить изменение энтропии водорода при этом процессе.

52 (52). Определить изменение энтропии, происходящее при смешивании 2 кг воды при температуре 250 К и 4 кг воды при температуре 300 К.

53 (53). Объем гелия, масса которого 1 кг, увеличился в четьре раза: а) изотермически; б) адиабатно. Каково изменение энтропии в этих случаях?

54 (54). Определить изменение энтропии 1 моль идеального газа при изохорном, изобарном и изотермическом процессах.

55 (55). Определить изменение энтропии 2 кг расплавленного свинца при охлаждении его от 327 до 10°C. Температура плавления свинца 327°C.

56 (56). Найти изменение энтропии при нагревании 1 кг воды от 0 до 100°C и последующем превращении ее в пар при той же температуре.

57 (57). Как изменится энтропия при изотермическом расширении 0,1 кг кислорода, если при этом объем его изменится от 5 до 10 л?

58 (58). Определить изменение энтропии при изобарном нагревании 0,1 кг азота от 17 до 97°C.

59 (59). Лед массой 0,2 кг, находящийся при температуре -30°C, превращается в пар. Определить изменение энтропии при этом.

60 (60). Железо массой 1 кг при температуре 100°C находится в тепловом контакте с таким же куском железа при 0°C. Чему будет равно изменение энтропии при достижении равновесной температуры 50°C? Считать, что молярная теплоемкость железа 25,14 Дж/К.

### III. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

#### ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

Изучение основ электродинамики начинается с электрического поля в вакууме. Эта тема является фундаментом раздела, включающего электростатику и постоянный ток.

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

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

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

Изучение темы «Постоянный электрический ток» следует начать с классической электронной теории проводимости металлов, на ее основе рассмотреть законы Ома и Джоуля — Ленца. Четко разграничить такие понятия, как разность потенциалов, электродвигущая сила и электрическое напряжение.

Контрольная работа № 3 составлена таким образом, что помогает проверить знания студентов по разделу «Электростатика. Постоянный ток». Она включает в себя задачи на определение напряженности поля и разности потенциалов, расчет простейших электрических полей с помощью принципа суперпозиции, определение электроемкости и энергии поля конденсаторов, применение законов Ома и Джоуля — Ленца.

#### ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Закон Кулона

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Напряженность электрического поля

$$E = \frac{\mathbf{F}}{Q}$$

Напряженность поля:

точечного заряда

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

бесконечно длинной заряженной нити

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}$$

равномерно заряженной плоскости

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

между двумя равномерно и разноименно заряженными бесконечными параллельными плоскостями

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

Напряженность поля, создаваемого металлической заряженной сферой радиусом  $R$  на расстоянии  $r$  от ее центра:

на поверхности сферы ( $r=R$ )

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

вне сферы ( $r>R$ )

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Смещение электрическое

Поток напряженности электрического поля

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\Phi = \int E_n dS$$

Работа перемещения заряда в электрическом поле из точки 1 в точку 2

$$A = Q \int_1^2 E_l dI; A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Потенциал поля, создаваемого точечным зарядом

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Потенциал электрического поля металлической полой сферы радиусом  $R$  на расстоянии  $r$  от центра сферы:

на поверхности и внутри сферы ( $r \leq R$ )

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

вне сферы ( $r > R$ )

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl}; E = -\text{grad } \varphi$$

$$F = \frac{\epsilon_0 E^2 S}{2} = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S}$$

Связь потенциала с напряженностью поля

Сила притяжения между двумя разноименными заряженными обкладками конденсатора

Электроемкость:

единичного проводника

$$C = \frac{Q}{\varphi}$$

плоского конденсатора

$$C = \frac{Q}{U}; C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

слоистого конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d_1/\epsilon_1 + d_2/\epsilon_2 + \dots + d_n/\epsilon_n}$$

Электроемкость батареи конденсаторов, соединенных

параллельно

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

последовательно

$$W_s = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q\varphi}{2}$$

$$W_s = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V$$

$$W_s = \frac{1}{2} (\epsilon - 1) \epsilon_0 E^2 V$$

заряженного конденсатора

поларизованного диэлектрика

Объемная плотность энергии электрического поля

$$w = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} - \frac{D^2}{2\epsilon_0}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

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

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

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Сила тока

Закон Ома для замкнутой (полней) цепи

Закон Ома в дифференциальной форме

Закон Джоуля — Ленца

Сопротивление однородного проводника

Удельная проводимость

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Зависимость удельного сопротивления от температуры

$$\rho = \rho_0 (1 + at)$$

Работа тока

Полная мощность, выделяющаяся в цепи

$$A = IUt = I^2 Rt = U^2 t / R$$

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

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. В углах при основании равнобедренного треугольника с боковой стороной 8 см расположены заряды  $Q_1$  и  $Q_2$ . Определить силу, действующую на заряд 1 нКл, помещенный в вершине треугольника. Угол при вершине  $120^\circ$ . Рассмотреть случаи:

- a)  $Q_1 = Q_2 = 2$  нКл;  
б)  $Q_2 = -Q_1 = 2$  нКл.

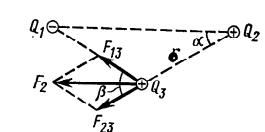
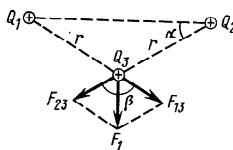


Рис. 1

Дано:  $|Q_1| = |Q_2| = 2 \cdot 10^{-9}$  Кл;  $Q_3 = 10^{-9}$  Кл;  $r = 0,08$  м;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\epsilon = 1$ .

Найти:  $F_1$ ;  $F_2$ .

Решение. В соответствии с принципом суперпозиции поле каждого из зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  действует на заряд  $Q_3$  независимо. Это значит, что на заряд  $Q_3$  действуют силы (рис. 1)

$$F_{13} = Q_1 Q_3 / (4\pi\epsilon_0 r^2), \quad F_{23} = Q_2 Q_3 / (4\pi\epsilon_0 r^2).$$

Так как  $|Q_1| = |Q_2|$ , то  $|F_{13}| = |F_{23}|$ . Векторная сумма  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{23}$  будет искомой величиной. Модуль силы определяется по теореме косинусов  $F = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13}F_{23} \cos \beta}$ . В случае одноименных зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  из рис. 1, а видно, что угол  $\beta = 120^\circ$ , поэтому  $F_1 = F_{13} = F_{23}$ :

$$F_1 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2};$$

$$F_1 = \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м} \cdot 64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 2,8 \text{ мкН}.$$

В случае разноименных зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  из рис. 1, б видно, что угол  $\beta = 60^\circ$  и, следовательно,

$$F_2 = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13}F_{23} \cos \beta} = F_1 \sqrt{3};$$

$$F_2 = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \sqrt{3} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 4,8 \text{ мкН}.$$

**Ответ:**  $F_1=2,8 \text{ мН}$ ;  $F_2=4,8 \text{ мН}$ .

2. Два равных отрицательных заряда по  $9 \text{ нКл}$  находятся в воде на расстоянии  $8 \text{ см}$  друг от друга. Определить напряженность и потенциал поля в точке, расположенной на расстоянии  $5 \text{ см}$  от зарядов.

**Дано:**  $Q_1=Q_2=-9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ ;  $\epsilon=81$ ;  $r_0=0,08 \text{ м}$ ;  $r_1=r_2=0,05 \text{ м}$ .

**Найти:**  $E$ ;  $\varphi$ .

**Решение.** Напряженность поля, создаваемого в точке  $A$  (рис. 2) зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$  по принципу суперпозиции полей, равна векторной сумме напряженностей, создаваемых каждым из зарядов:

$$\mathbf{E}=\mathbf{E}_1+\mathbf{E}_2. \quad (1)$$

По теореме косинусов,

$$E=\sqrt{E_1^2+E_2^2+2E_1E_2\cos 2\alpha}. \quad (2)$$

Напряженность поля точечного заряда  $Q$

$$E=Q/(4\pi\epsilon_0 r^2),$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $r$  — расстояние от заряда до точки поля, в которой определяется его напряженность. Заряды  $Q_1$  и  $Q_2$  отрицательны, следовательно, векторы  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  направлены по линиям напряженности к зарядам. По условию задачи, заряды  $Q_1=Q_2$  расположены на одинаковом расстоянии от точки  $A$ , поэтому  $E_1=E_2$ . Следовательно, формула (2) примет вид  $E=2E_1 \cos \alpha$ , где  $\cos \alpha=h/r_1$ ,

$$h=OA=\sqrt{r_1^2-r_0^2}/4; \quad h=\sqrt{(5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2-(4 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}=3 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Тогда напряженность в точке  $A$

$$E=\frac{2Q_1h}{4\pi\epsilon_0 r_1^3};$$

$$E=\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{4 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 81 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot (0,05)^3 \text{ м}^3}=480 \text{ В/м}.$$

Потенциал  $\varphi$ , создаваемый системой точечных зарядов в данной точке поля, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов  $\varphi=\sum_{i=1}^n \varphi_i$ . Потенциал  $\varphi$  результирующий, создаваемый полем в точке  $A$  равен  $\varphi=\varphi_1+\varphi_2$ . Потенциал поля, создаваемого точечным зарядом,  $\varphi=Q/(4\pi\epsilon_0 r)$ . Следовательно,

$$\varphi=\varphi_1+\varphi_2=\frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}+\frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2}=\frac{2Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1};$$

$$\varphi=\frac{-2 \cdot 9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 81 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}}=-40 \text{ В}.$$

**Ответ:**  $E=480 \text{ В/м}$ ;  $\varphi=-40 \text{ В}$ .

3. Заряд  $1 \text{ нКл}$  переносится в воздухе из точки, находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от бесконечно длинной равномерно заряженной нити, в точку на расстоянии  $10 \text{ см}$  от нее. Определить работу, совершающую против сил поля, если линейная плотность заряда нити  $1 \text{ мкКл/м}$ . Какая работа совершается на последних  $10 \text{ см}$  пути?

**Дано:**  $r_0=0,1 \text{ м}$ ;  $r_1=1 \text{ м}$ ;  $r_2=0,2 \text{ м}$ ;  $Q=1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ ;  $\epsilon=1$ ;  $\tau=1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}$ .

**Найти:**  $A_1$ ;  $A_2$ .

**Решение.** Работа внешней силы по перемещению заряда  $Q$  из точки поля с потенциалом  $\varphi_i$  в точку с потенциалом  $\varphi_0$  равна

$$A=Q(\varphi_0-\varphi_i). \quad (1)$$

Бесконечная равномерно заряженная нить с линейной плотностью заряда  $\tau$  создает аксиально симметричное поле напряженностью  $E=\tau/(2\pi\epsilon_0 r)$ . Напряженность и потенциал этого поля связаны соотношением  $E=-d\varphi/dr$ , откуда  $d\varphi=-Edr$ . Разность потенциалов точек поля на расстоянии  $r_1$  и  $r_0$  от нити

$$\begin{aligned} \varphi_0-\varphi_1 &= -\int_{r_1}^{r_0} E dr = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_0} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_0}{r_1}; \\ \varphi_0-\varphi_2 &= -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_0}; \quad \varphi_0-\varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя в формулу (1) найденное выражение для разности потенциалов из (2), определим работу, совершающую внешними силами по перемещению заряда из точки, находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  до точки, расположенной на расстоянии  $0,1 \text{ м}$  от нити:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_0}; \\ A_1 &= \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м} \cdot \ln 10}{2 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Работа по перемещению заряда на последних  $10 \text{ см}$  пути равна

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_0}; \\ A_2 &= \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м} \cdot \ln 2}{2 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $A_1=4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ ;  $A_2=1,25 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ .

4. К одной из обкладок плоского конденсатора прилегает стеклянная плоскопараллельная пластинка ( $\epsilon_1=7$ ) толщиной

9 мм. После того как конденсатор отключили от источника напряжения 220 В и вынули стеклянную пластинку, между обкладками установилась разность потенциалов 976 В. Определить заряды между обкладками и отношение конечной и начальной энергий конденсатора.

**Дано:**  $U_1 = 220$  В;  $U_2 = 976$  В;  $d_1 = 9 \cdot 10^{-3}$  м;  $\epsilon_1 = 7$ ;  $\epsilon_2 = 1$ .

**Найти:**  $d_0$ ;  $W_2/W_1$ .

**Решение.** После отключения конденсатора и удаления стеклянной пластины заряд на его обкладках остается неизменным, т. е. выполняется равенство

$$C_1 U_1 = C_2 U_2, \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — емкости конденсатора в начальном и конечном случаях.

По условию задачи, конденсатор вначале является слоистым и его электроемкость определяется по формуле

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1/\epsilon_1 + (d_0 - d_1)/\epsilon_2}, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь обкладок;  $d_0$  — зазор между ними,  $d_1$  — толщина стеклянной пластины;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — диэлектрические проницаемости стекла и воздуха соответственно.

После удаления стеклянной пластины электроемкость конденсатора

$$C_2 = \epsilon_2 \epsilon_0 S / d_0. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем

$$\frac{\epsilon_0 S U_1}{d_1/\epsilon_1 + (d_0 - d_1)/\epsilon_2} = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S U_2}{d_0}$$

откуда

$$d_0 = \frac{U_2 d_1}{U_2 - U_1} \left(1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right);$$

$$d_0 = \frac{976 \text{ В} \cdot 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{(976 - 220) \text{ В}} \left(1 - \frac{1}{7}\right) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Начальная и конечная энергии конденсатора

$$W_1 = C_1 U_1^2 / 2, \quad W_2 = C_2 U_2^2 / 2.$$

Тогда отношение этих энергий  $W_2/W_1 = C_2 U_2^2 / (C_1 U_1^2)$ . С учетом (1) получим

$$W_2/W_1 = U_2/U_1; \quad W_2/W = 976 \text{ В}/220 \text{ В} = 4,44.$$

**Ответ:**  $d_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  м;  $W_2/W_1 = 4,44$ .

5. Батарею из двух конденсаторов емкостью 400 и 500 пФ соединили последовательно и включили в сеть с напряжением 220 В. Потом батарею отключили от сети, конденсаторы разъединили и соединили параллельно обкладками, имеющими одно-

именные заряды. Каким будет напряжение на зажимах полученной батареи?

**Дано:**  $U_1 = 220$  В;  $C_1 = 400$  пФ;  $C_2 = 500$  пФ.

**Найти:**  $U_2$ .

**Решение.** У последовательно соединенных конденсаторов заряды на обкладках равны по модулю  $Q_1 = Q_2 = Q$  и заряд батареи равен заряду одного конденсатора. Емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов определяется по формуле  $1/C = \sum_{i=1}^n 1/C_i$ . Для батареи из двух конденсаторов  $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ , а их заряд

$$Q = C U_1 = C_1 C_2 U_1 / (C_1 + C_2). \quad (1)$$

При отключении конденсаторов их заряд сохраняется. У параллельно соединенных конденсаторов заряд батареи равен сумме зарядов конденсаторов  $Q' = Q_1 + Q_2$ , а емкость — сумме емкостей  $C' = C_1 + C_2$ .

Напряжение на зажимах батареи из двух параллельно соединенных конденсаторов

$$U_2 = \frac{Q'}{C'} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} = \frac{2Q}{C_1 + C_2}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получаем

$$U_2 = \frac{2C_1 C_2 U_1}{(C_1 + C_2)^2};$$

$$U_2 = \frac{2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 10^{-20} \text{ Ф} \cdot 220 \text{ В}}{92 \cdot 10^{-20} \text{ Ф}^2} = 108,6 \text{ В.}$$

**Ответ:**  $U_2 = 108,6$  В.

6. Заряд конденсатора 1 мКл, площадь пластин 100 см<sup>2</sup>, зазор между пластинами заполнен слюдой. Определить объемную плотность энергии поля конденсатора и силу притяжения пластины.

**Дано:**  $Q = 10^{-6}$  Кл;  $S = 10^{-2}$  м<sup>2</sup>;  $\epsilon = 6$ .

**Найти:**  $w$ ;  $F$ .

**Решение.** Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками конденсатора

$$F = \epsilon_0 E^2 S / 2, \quad (1)$$

где  $E$  — напряженность поля конденсатора;  $S$  — площадь обкладок конденсатора;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость слюды;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Напряженность однородного поля плоского конденсатора

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 S} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}, \quad (2)$$

где  $\sigma = Q/S$  — поверхностная плотность заряда. Подставляя (2) в (1), получаем

$$F = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S}; \quad F = \frac{10^{12} \text{ Кл}^2}{2 \cdot 6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 10^{-12} \text{ м}^2} = 0,94 \text{ Н.}$$

Объемная плотность энергии электрического поля

$$\omega = \epsilon_0 E^2 / 2. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), получаем

$$\omega = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S^2}; \quad \omega = \frac{10^{-12} \text{ Кл}^2}{2 \cdot 6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 94,2 \text{ Дж/м}^3.$$

**Ответ:**  $F = 0,94 \text{ Н}$ ;  $\omega = 94,2 \text{ Дж/м}^3$ .

7. В медном проводнике сечением  $6 \text{ мм}^2$  и длиной 5 м течет ток. За 1 мин в проводнике выделяется 18 Дж теплоты. Определить напряженность поля, плотность и силу электрического тока в проводнике.

Дано:  $S = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $I = 5 \text{ м}$ ;  $t = 60 \text{ с}$ ;  $Q = 18 \text{ Дж}$ ;  $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**Найти:**  $E$ ;  $j$ ;  $I$ .

**Решение.** Для решения задачи используем законы Ома и Джоуля — Ленца. Закон Ома в дифференциальной форме имеет вид

$$j = \gamma E, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока;  $E$  — напряженность поля;  $\gamma$  — удельная проводимость, а закон Джоуля — Ленца

$$Q = I^2 R t. \quad (2)$$

Здесь  $I$  — сила тока,  $t$  — время,

$$R = \rho l / S \quad (3)$$

— сопротивление проводника, где  $\rho$ ,  $l$ ,  $S$  — удельное сопротивление, длина и площадь поперечного сечения проводника соответственно.

Силу тока  $I$  находим из (2) с учетом (3):

$$I = \sqrt{\frac{Q}{Rt}} = \sqrt{\frac{QS}{\rho l t}}; \quad I = \sqrt{\frac{18 \text{ Дж} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 5 \cdot 60 \text{ с}}} = 4,6 \text{ А.}$$

По определению, плотность тока равна  $j = I/S$ ;

$$j = 4,6 A / (6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2) = 7,7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2.$$

Напряженность поля в проводнике определим из (1), учитывая, что  $\gamma = 1/\rho$ :

$$E = j\rho; \quad E = 7,7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ В/м.}$$

**Ответ:**  $E = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$ ;  $I = 4,6 \text{ А}$ ;  $j = 7,7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$ .

8. Внутреннее сопротивление аккумулятора 2 Ом. При замыкании его одним резистором сила тока равна 4 А, при замыкании другим — 2 А. Во внешней цепи в обоих случаях выделяется

одинаковая мощность. Определить ЭДС аккумулятора и внешние сопротивления.

**Дано:**  $r = 2 \text{ Ом}$ ;  $I_1 = 4 \text{ А}$ ;  $I_2 = 2 \text{ А}$ ;  $N_1 = N_2$ .

**Найти:**  $\mathcal{E}$ ;  $R_1$ ;  $R_2$ .

**Решение.** Закон Ома для замкнутой (полной) цепи имеет вид

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}, \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}, \quad (1)$$

где  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока;  $\mathcal{E}$  — ЭДС аккумулятора;  $R_1$  и  $R_2$  — внешние сопротивления цепей.

Уравнения (1) представим в виде

$$\mathcal{E} = I_1(R_1 + r), \quad \mathcal{E} = I_2(R_2 + r). \quad (2)$$

Из равенств (2) следует

$$I_1(R_1 + r) = I_2(R_2 + r). \quad (3)$$

Мощность, выделяемая во внешней цепи в первом и втором случаях,

$$N_1 = I_1^2 R_1, \quad N_2 = I_2^2 R_2.$$

Из условия равенства мощностей следует

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_2. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4), получаем

$$R_1 = \frac{I_2 r}{I_1}; \quad R_2 = \frac{I_1 r}{I_2}; \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{2 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом}}{4 \text{ А}} = 1 \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{4 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом}}{2 \text{ А}} = 4 \text{ Ом.}$$

Подставляя (5) в (2), получаем

$$\mathcal{E} = I_1 r \left( \frac{I_2}{I_1} + 1 \right);$$

$$\mathcal{E} = 4 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} \cdot \left( \frac{2 \text{ А}}{4 \text{ А}} + 1 \right) = 12 \text{ В.}$$

**Ответ:**  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$ ;  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ .

9. ЭДС батареи равна 20 В. КПД батареи составляет 0,8 при силе тока 4 А. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

**Дано:**  $\mathcal{E} = 20 \text{ В}$ ;  $\eta = 0,8$ ;  $I = 4 \text{ А}$ .

**Найти:**  $r$ . **Решение.** КПД источника тока  $\eta$  равен отношению падения напряжения во внешней цепи к его ЭДС:

$$\eta = \frac{RI}{\mathcal{E}}, \quad (1)$$

откуда

$$R = \eta \mathcal{E} / I. \quad (2)$$

Используя выражение закона Ома для замкнутой цепи  $I = \mathcal{E} / (R + r)$ , получаем

$$\eta = \frac{R}{R+r}. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3) и выполнив преобразования, находим

$$r = \frac{\mathcal{E}(1-\eta)}{I}; \quad r = \frac{20 \text{ В} (1-0,8)}{4 \text{ А}} = 1 \text{ Ом.}$$

**Ответ:**  $r = 1 \text{ Ом.}$

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 3 (2)

1. В вершинах квадрата со стороной 1 м расположены равные одноименные заряды. Потенциал создаваемого ими поля в центре квадрата равен 50 В. Определить заряд.

2. В вершинах квадрата со стороной 1 м расположены заряды одинаковой величины. В случае, когда два соседних заряда положительные, а два других — отрицательные, напряженность поля в центре квадрата равна 36 В/м. Определить заряд.

3. В вершинах квадрата со стороной 1 м помещены заряды по 1 нКл. Определить напряженность и потенциал поля в центре квадрата, если один из зарядов отличается по знаку от остальных.

4. Пространство между двумя параллельными бесконечными плоскостями с поверхностью плотностью зарядов  $+4 \cdot 10^{-8}$  и  $-7 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup> заполнено диэлектриком ( $\epsilon = 6$ ). Определить напряженность поля: а) между плоскостями; б) вне плоскостей.

5. На расстоянии 16 см друг от друга в воздухе находятся два заряда по 4 нКл. Определить напряженность и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от зарядов.

6. Две параллельные плоскости одноименно заряжены с поверхностью плотностью зарядов 0,5 и 1,5 мКл/м<sup>2</sup>. Определить напряженность поля: а) между плоскостями; б) вне плоскостей.

7. Если в центр квадрата, в вершинах которого находятся заряды по  $+1$  нКл, поместить отрицательный заряд, то результатирующая сила, действующая на каждый заряд, будет равна нулю. Вычислить числовое значение отрицательного заряда.

8. Заряды по 2 нКл помещены в вершинах равностороннего треугольника со стороной 20 см. Равнодействующая сил, действующих на четвертый заряд, помещенный на середине одной из сторон треугольника, равна 0,6 мКН. Определить этот заряд, напряженность и потенциал поля в точке его расположения.

9. Два шарика массой по 0,1 г подвешены в общей точке на нитях длиной 1 м. Шарикам сообщили заряд и нити разошлись на угол 90°. Определить напряженность и потенциал поля в точке подвеса шариков.

10. Два одинаковых заряда находятся в воздухе на расстоянии 10 см друг от друга. Напряженность поля в точке, удаленной

на расстоянии 6 см от одного и 8 см от другого заряда, равна 1 кВ/м. Определить потенциал поля в этой точке и значение зарядов.

11. Пылинка массой  $4 \cdot 10^{-15}$  кг удерживается в равновесии между горизонтально расположенными обкладками плоского конденсатора. Разность потенциалов между обкладками 245 В, а зазор между ними 1 см. Определить, во сколько раз заряд пылинки больше элементарного заряда.

12. В поле бесконечно равномерно заряженной плоскости с поверхностью плотностью заряда 1 мКл/м<sup>2</sup> перемещается заряд из точки, находящейся на расстоянии 0,5 м от плоскости в точку на расстоянии 1 м от нее. Определить заряд, если при этом совершается работа 0,1 мДж.

13. Какую работу нужно совершить, чтобы заряды 5 и 2 нКл, находившиеся на расстоянии 1 м, сблизились до 0,1 м?

14. Поверхностная плотность заряда бесконечно равномерно заряженной плоскости равна 3 нКл/м<sup>2</sup>. Определить поток вектора напряженности через поверхность сферы диаметром 75 см, рассекаемой этой плоскостью пополам.

15. Заряд 0,1 нКл переносится из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 1 см от поверхности металлической сферы радиусом 5 см, заряженной с поверхностью плотностью  $10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>. Определить работу перемещения заряда.

16. Заряд — 1 нКл притянулся к бесконечной плоскости, равномерно заряженной с поверхностью плотностью 1 мКл/м<sup>2</sup>. На каком расстоянии от плоскости находился заряд, если работа сил поля по его перемещению равна 5 мДж?

17. Какую работу совершают силы поля, если одноименные заряды 3 и 5 нКл, находившиеся на расстоянии 5 см, разошлись до расстояния 10 см?

18. Со скоростью  $2 \cdot 10^7$  м/с электрон влетает в пространство между обкладками плоского конденсатора в середине зазора в направлении, параллельном обкладкам. При какой минимальной разности потенциалов на обкладках электрон не вылетит из конденсатора, если длина конденсатора 10 см, а расстояние между его обкладками 1 см?

19. Заряд — 1 нКл переместился в поле заряда +3 нКл из точки с потенциалом 200 В в точку с потенциалом 1200 В. Определить работу сил поля и расстояние между этими точками.

20. Заряд 1 нКл находится на расстоянии 20 см от бесконечно длинной равномерно заряженной нити. Под действием поля нити заряд перемещается на 10 см. Определить линейную плотность заряда нити, если работа сил поля равна 0,1 мДж.

21. Конденсатор с парафиновым диэлектриком заряжен до разности потенциалов 150 В. Напряженность поля в нем  $6 \cdot 10^4$  В/м, площадь пластин  $60 \text{ см}^2$ . Определить емкость конденсатора и поверхностную плотность заряда на обкладках.

**22.** Вычислить емкость батареи, состоящей из трех конденсаторов емкостью 4 мкФ каждый, при всех возможных случаях их соединения.

**23.** Заряд на каждом из двух последовательно соединенных конденсаторов емкостью 6 и 10 пКФ равен 0,09 нКл. Определить напряжение: а) на батарее конденсаторов; б) на каждом конденсаторе.

**24.** Конденсатор емкостью 3 мкФ последовательно соединен с конденсатором неизвестной емкости и они подключены к источнику постоянного напряжения 12 В. Определить емкость второго конденсатора и напряжение на каждом конденсаторе, если заряд батареи 25 мКл.

**25.** Определить разность потенциалов и заряд на каждом из конденсаторов емкостью 2 и 3 мкФ, если они соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения 50 В.

**26.** Два конденсатора одинаковой емкости по 6 мкФ заряжены один до напряжения 100 В, а другой до 300 В. Определить напряжение между обкладками конденсаторов, если их соединить параллельно: а) одновременно; б) разновременно заряженными обкладками.

**27.** Плоский слюдянный конденсатор с площадью пластин 5 см<sup>2</sup> и зазором 2 мм находится под напряжением 300 В. Определить емкость конденсатора и силу притяжения его пластин.

**28.** При каком соединении трех конденсаторов емкостью 1,2 и 3 мкФ емкость батареи будет минимальной и максимальной? Вычислить минимальное и максимальное значение емкости батареи.

**29.** Расстояние между обкладками плоского воздушного конденсатора 2 мм, площадь 100 см<sup>2</sup>, разность потенциалов 60 В. Какую работу надо совершить, чтобы раздвинуть обкладки до расстояния 1 см?

**30.** Один конденсатор заряжен до разности потенциалов 60 В, другой — до 20 В. Конденсаторы соединили параллельно одновременно заряженными обкладками, и разность потенциалов оказалась равной 50 В. Определить отношение емкостей этих конденсаторов.

**31.** Обкладки плоского воздушного конденсатора площадью 100 см<sup>2</sup> и зарядом 4 мКл раздвигают на 1 см. Определить совершающую при этом работу.

**32.** Плоский воздушный конденсатор с площадью обкладок 10 см<sup>2</sup> и зазором 5 мм заряжен до разности потенциалов 100 В. Какую работу надо совершить, чтобы раздвинуть обкладки до расстояния 1 см?

**33.** Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов 300 В. Площадь пластин 100 см<sup>2</sup>, напряженность поля в зазоре между ними 60 кВ/м. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах, емкость и энергию конденсатора.

**34.** Разность потенциалов между обкладками плоского конденсатора 2 кВ, зазор 2 см, заряд на каждой обкладке 1 нКл. Определить силу притяжения обкладок и энергию конденсатора.

**35.** Найти объемную плотность энергии электрического поля, создаваемого заряженной металлической сферой радиусом 5 см на расстоянии 2 см от ее поверхности, если поверхностная плотность заряда на ней 7,5 мКл/м<sup>2</sup>.

**36.** Площадь пластин плоского слюдянного конденсатора 11,3 см<sup>2</sup>, зазор между ними 3 мм. При разряде конденсатора выделилась энергия 10 мКДж. До какой разности потенциалов был заряжен конденсатор?

**37.** Энергия плоского воздушного конденсатора 4 мКДж, разность потенциалов на обкладках 600 В, площадь пластин 100 см<sup>2</sup>. Определить расстояние между обкладками, напряженность и объемную плотность энергии поля конденсатора.

**38.** Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов 100 В. Площадь пластин 11,3 см<sup>2</sup>, расстояние между ними 5 мм. Определить, как изменяется емкость, энергия и объемную плотность энергии конденсатора, если зазор заполнить парфином.

**39.** Под действием силы притяжения 1 мН диэлектрик между обкладками конденсатора находится под давлением 1 Па. Определить энергию и объемную плотность энергии поля конденсатора, если расстояние между его обкладками 1 мм.

**40.** Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин 100 см<sup>2</sup> и зазором 5 мм заряжен до разности потенциалов 900 В. Не отключая от источника напряжения, пластины раздвигают до расстояния 1 см. Определить напряженность поля, энергию конденсатора и объемную плотность энергии до и после раздвижения пластин.

**41.** Определить удельное сопротивление и материал провода, который намотан на катушку, имеющую 500 витков со средним диаметром витка 6 см, если при напряжении 320 В допустимая плотность тока 2 МА/м<sup>2</sup>.

**42.** Плотность тока в никелиновом проводнике длиной 4 м равна 1 МА/м<sup>2</sup>. Определить разность потенциалов на концах проводника.

**43.** Определить плотность тока, текущего по резистору длиной 5 м, если на концах его поддерживается разность потенциалов 2 В. Удельное сопротивление материала 2 мкОм·м.

**44.** Определить заряд, прошедший по резистору за 10 с, если сила тока в резисторе за это время равномерно возрастала от 0 до 5 А.

**45.** Напряжение на концах проводника сопротивлением 5 Ом за 0,5 с равномерно возрастает от 0 до 20 В. Какой заряд проходит через проводник за это время?

**46.** Определить разность потенциалов на концах никромового проводника длиной 1 м, если плотность тока, текущего по нему,  $2 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>.

47. Температура вольфрамовой нити электролампы  $2000^{\circ}\text{C}$ , диаметр 0,02 мм, сила тока в ней 4 А. Определить напряженность поля в нити.

48. Плотность тока в проводнике равна  $1 \text{ MA/m}^2$  при напряжении 200 В на его концах. Определить удельное сопротивление и материал проводника, если его длина 500 м.

49. На концах никелевого проводника длиной 5 м поддерживается разность потенциалов 12 В. Определить плотность тока в проводнике, если его температура  $540^{\circ}\text{C}$ .

50. Определить заряд, прошедший по резистору с сопротивлением 1 Ом, при равномерном возрастании напряжения на концах резистора от 1 до 3 В в течение 10 с.

51. Внутреннее сопротивление аккумулятора 1 Ом. При силе тока 2 А его КПД равен 0,8. Определить ЭДС аккумулятора.

52. Определить ЭДС аккумуляторной батареи, ток короткого замыкания которой 10 А, если при подключении к ней резистора сопротивлением 9 Ом сила тока в цепи равна 1 А.

53. При каком внешнем сопротивлении потребляемая полезная мощность будет максимальной, если два одинаковых источника тока с внутренним сопротивлением 1 Ом каждый соединены последовательно?

54. Решить задачу 53 для случая, когда источники тока соединены параллельно.

55. ЭДС аккумулятора автомобиля 12 В. При силе тока 3 А его КПД равен 0,8. Определить внутреннее сопротивление аккумулятора.

56. К батарее из трех одинаковых параллельно соединенных источников тока подключают один раз резистор сопротивлением 1 Ом, другой раз — 4 Ом. В обоих случаях на резисторах за одно и то же время выделяется одинаковое количество теплоты. Определить внутреннее сопротивление источника тока.

57. КПД аккумуляторной батареи при силе тока 2 А равен 0,8. Определить внутреннее сопротивление батареи, если ее ЭДС равна 10 В.

58. Два одинаковых источника тока соединены в одном случае последовательно, в другом — параллельно и замкнуты на внешнее сопротивление 1 Ом. При каком внутреннем сопротивлении источника сила тока во внешней цепи будет в обоих случаях одинаковой?

59. Падение напряжения во внешней цепи равно 5,1 В. Определить силу тока в цепи, ЭДС и КПД источника тока, если его внутреннее сопротивление 1,5 Ом, а сопротивление внешней цепи 8,5 Ом.

60. При замыкании аккумуляторной батареи на сопротивление 9 Ом в цепи идет ток 1 А. Ток короткого замыкания равен 10 А. Какую наибольшую полезную мощность может дать батарея?

## IV. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

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

Изучая этот раздел, студент должен усвоить закон Ампера, знать и уметь применять закон Био — Савара — Лапласа для расчета магнитной индукции или напряженности магнитного поля прямoliniйного и кругового токов, а также закон полного тока (циркуляция вектора магнитной индукции) для распределения магнитного поля торонда и длинного соленоида. При изучении вопроса, связанного с действием магнитного поля на движущиеся заряды, нужно уметь применять формулу силы Лоренца, определять направление движения заряженных частиц в магнитном поле, представлять себе принцип циклических ускорителей заряженных частиц, а также определять работу перемещения проводника и контура с током в магнитном поле.

При изучении явления электромагнитной индукции необходимо усвоить, что механизм возникновения ЭДС индукции имеет электронный характер. Изучив основной закон электромагнитной индукции Фарадея — Максвелла, студент на его основе должен уметь вывести и применять для расчетов формулы ЭДС индукции, энергии магнитного поля.

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

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

Изучение темы «Волны» целесообразно начинать с механических волн, распространяющихся в упругих средах. Здесь следует обратить внимание на картину мгновенного распределения смещений и скоростей в бегущей волне, различие между бегущей и стоячей волнами, зависимость фазовой скорости от частоты колебаний, найти связь между групповой и фазовой скоростями и показать их равенство в отсутствие лисперсии волны. Особое внимание студент должен уделить условию интерференции волн, энергетическому соотношению при интерференции волн, понять и объяснить перераспределение энергии при образовании минимумов и максимумов интенсивности. Переходя к изучению электромагнитных волн, студенту следует ясно представить себе физический смысл уравнений Максвелла (в интегральной форме) и, опираясь на них, рассмотреть свойства этих волн. Нужно четко представлять, что переменные электрическое и магнитное поле взаимосвязаны, они поддерживают друг друга и могут существовать независимо от источника, их породившего, распространяясь в пространстве в виде электромагнитной волны. Другими словами, электромагнитная волна — это распространяющееся в пространстве пе-

ременное электромагнитное поле. Под энергией электромагнитного поля следует подразумевать сумму энергий электрического и магнитного полей. Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является колеблющийся электрический диполь. Следует помнить, что если диполь совершает гармонические колебания, то он излучает монохроматическую волну.

Контрольная работа № 4 представлена набором таких задач, которые помогут студенту проверить свои знания по таким вопросам, как применение закона Био — Савара — Лапласа для расчета магнитной индукции (или напряженности) магнитного поля, создаваемого проводниками с током различной конфигурации, научиться применять принцип суперпозиции при определении индукции или напряженности простейших полей, определять траекторию движения заряженной частицы, ее заряд и силу, действующую на движущуюся частицу в магнитном поле, вычислять работу, совершающую силами как при движении прямолинейного проводника с током, так и при вращении контура с током различной конфигурации в магнитном поле, находить энергию и объемную плотность энергии магнитного поля соленоида.

Задачи на гармонические колебания охватывают такие вопросы, как определение амплитуды, скорости, ускорения, энергии при механических колебаниях, периода, электромеханической, индуктивности, силы тока, напряжения, энергии при электромагнитных колебаниях. Волновые процессы представлены задачами, в которых определяются период, длина, скорость распространения, энергия и объемная плотность энергии механических и электромагнитных волн.

### ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

#### Закон Ампера

Механический момент, действующий на контур с током, помещенный в магнитное поле

#### Магнитный момент контура с током

Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля

#### Закон Био — Савара — Лапласа

Магнитная индукция в центре кругового тока

#### Магнитная индукция:

поля, созданного бесконечно длинным прямым проводником с током

поля, созданного отрезком проводника с током

поля бесконечно длинного соленоида и тороида

Сила взаимодействия двух прямолинейных бесконечно длинных параллельных проводников с током

Напряженность магнитного поля, создаваемого движущимся зарядом  $Q$

#### Сила Лоренца

Магнитный поток однородного магнитного поля

$$\mathbf{F} = I\mathbf{B}\mathbf{l}$$

$$M = p_m B \sin \alpha$$

$$p_m = IS$$

$$B = \mu_0 H$$

$$dB = \frac{\mu_0 I \sin \alpha}{4\pi r^2} dl$$

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

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

$$B = \mu_0 nI$$

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

$$H = \frac{Qv \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

$$\mathbf{F}_L = Q \mathbf{E} + Q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Работа по перемещению контура с током в магнитном поле

Основной закон электромагнитной индукции

Потокосцепление

Потокосцепление соленоида

Электродвижущая сила самоиндукции

Индуктивность соленоида

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при возникновении в нем индукционного тока

Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$

$$A = I \Delta \Phi$$

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$$\Psi = N\Phi$$

$$\Psi = LI$$

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

$$L = \mu_0 n^2 S$$

$$Q = -\frac{\Delta \Psi}{R}$$

$$I = I_0 \exp \left( -\frac{Rt}{L} \right) + \frac{\mathcal{E}}{R} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{Rt}{L} \right) \right]$$

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

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

$$s = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

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

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

$$\lambda = vT$$

$$s = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

$$P = E \times H$$

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 50 см друг от друга, в одном направлении текут токи  $I_1$  и  $I_2$  силой по 5 А. Между проводниками на расстоянии 30 см от первого расположен кольцевой проводник с током  $I_3$  силой 5 А (рис. 3). Радиус кольца 20 см. Определить индукцию и напряженность магнитного поля, создаваемого токами в центре кольцевого проводника.

**Дано:**  $I_1 = I_2 = I_3 = I = 5$  А;  $r_1 = 0,3$  м;  $r_2 = 0,2$  м;  $r_3 = 0,2$  м.  
**Найти:**  $B$ ;  $H$ .

**Решение.** В соответствии с принципом суперпозиции индукция результирующего магнитного поля в точке  $A$  равна

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \mathbf{B}_3, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  — индукции полей, создаваемых соответственно токами  $I_1$  и  $I_2$ , направленными за плоскость рисунка;  $\mathbf{B}_3$  — индукция поля, создаваемая кольцевым током. Как видно из рис. 3,

векторы  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  направлены по одной прямой в противоположные стороны, поэтому их сумма  $\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_{12}$  равна по модулю

$$B_{12} = B_2 - B_1. \quad (2)$$

Индукция поля, создаваемого бесконечно длинным проводником с током,

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_1}, \quad B_2 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_2}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu$  — магнитная проницаемость среды (для воздуха  $\mu=1$ );  $r_1, r_2$  — расстояния от проводников до центра кольца. Подставляя (3) в (2), получаем

$$B_{12} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi} \frac{(r_1 - r_2)}{r_1 r_2}. \quad (4)$$

Индукция поля, создаваемого кольцевым проводником с током,

$$B_3 = \frac{\mu\mu_0 I}{2r_3}, \quad (5)$$

где  $r_3$  — радиус кольца.

Как видно из рис. 3, векторы  $\mathbf{B}_{12}$  и  $\mathbf{B}_3$  взаимно перпендикулярны, поэтому  $B = \sqrt{B_{12}^2 + B_3^2}$  или с учетом выражений (4) и (5)

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2} \sqrt{\frac{(r_1 - r_2)^2}{\pi^2 r_1^2 r_2^2} + \frac{1}{r_3^2}};$$

$$B = \frac{1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 5 \text{ А}}{2} \sqrt{\frac{(0,3 - 0,2)^2 \text{ м}^2}{3,142 \cdot 0,3^2 \cdot 0,2^2 \text{ м}^4} + \frac{1}{0,2^2 \text{ м}^2}} =$$

$$= 32,7 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} = 32,7 \text{ мкТл.}$$

Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}; \quad H = \frac{32,7 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}}{1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}} = 26 \text{ А/м.}$$

Ответ:  $B = 32,7 \text{ мкТл}; H = 26 \text{ А/м.}$

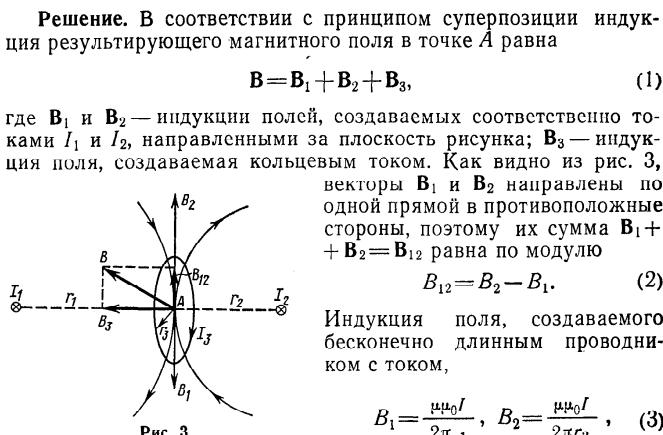


Рис. 3

2. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 88 кВ, влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции. Индукция поля равна 0,01 Тл. Определить радиус траектории электрона.

Дано:  $U = 88 \text{ кВ}; B = 0,01 \text{ Тл}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$

Найти:  $r$ .

Решение. В магнитном поле с индукцией  $B$  на электрон, движущийся со скоростью  $v$  перпендикулярно  $B$ , действует сила Лоренца

$$F = evB, \quad (1)$$

которая обуславливает центростремительное ускорение электрона при его движении по окружности:

$$evB = mv^2/r, \quad (2)$$

где  $m$  — масса электрона;  $e$  — его заряд;  $r$  — радиус траектории его движения.

Пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U$ , электрон приобретает кинетическую энергию  $mv^2/2$ , равную работе  $A$  сил электрического поля  $mv^2/2 = eU$ . Отсюда находим скорость электрона:

$$v = \sqrt{2eU/m}. \quad (3)$$

Из уравнения (2) с учетом (3) найдем радиус траектории:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um}{e}};$$

$$r = \frac{1}{10^{-2} \text{ Тл}} \sqrt{\frac{2 \cdot 88 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} = 0,1 \text{ м.}$$

Ответ:  $r = 0,1 \text{ м.}$

3. Соленоид длиной 20 см и диаметром 4 см имеет плотную трехслойную обмотку из провода диаметром 0,1 мм. По обмотке соленоида течет ток 0,1 А. Зависимость  $B=f(H)$  для материала сердечника дана на рис. 4. Определить напряженность и индукцию поля в соленоиде, магнитную проницаемость сердечника, индуктивность соленоида, энергию и объемную плотность энергии поля соленоида.

Дано:  $l = 0,2 \text{ м}; D = 0,04 \text{ м}; N = 3; d = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}; I = 0,1 \text{ А.}$

Найти:  $H; B; \mu; L; W; w$ .

Решение. Поле внутри соленоида можно считать однородным. В этом случае напряженность поля

$$H = In, \quad (1)$$

где  $I$  — сила тока в обмотке,

$$n = N/d \quad (2)$$

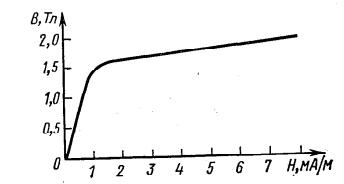


Рис. 4

— число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;  $N$  — число слоев обмотки;  $d$  — диаметр провода. Тогда

$$H = \frac{IN}{d}; H = \frac{0,1A \cdot 3}{1 \cdot 10^{-4} m} = 3000 \text{ A/m}.$$

По графику  $B=f(H)$  находим, что напряженности 3000 А/м соответствует индукция 1,7 Тл. Используя связь между индукцией и напряженностью

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (3)$$

определим магнитную проницаемость

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}; \mu = \frac{1,7 \text{ Тл}}{12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 3000 \text{ А/м}} = 450.$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 l / S, \quad (3)$$

где  $l$  — длина,  $S = \pi D^2 / 4$  — площадь поперечного сечения соленоида. С учетом (2) получаем

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{d^2} l \frac{\pi D^2}{4}; \quad (4)$$

$$L = \frac{450 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 3^2 \cdot 0,2 \text{ м} \cdot 3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2} = 128 \text{ Гн.}$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$w = \frac{BH}{2}; w = \frac{1,7 \text{ Тл} \cdot 3000 \text{ А/м}}{2} = 2,55 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3.$$

Энергия магнитного поля соленоида

$$W = wSl \quad (5) \text{ или } W = \frac{LI^2}{2}. \quad (6)$$

Подставляя числовые данные в (6), получаем

$$W = 128 \text{ Гн} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ А}^2 \cdot 0,5 = 0,64 \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $H = 3000 \text{ А/м}$ ;  $B = 1,7 \text{ Тл}$ ;  $\mu = 450$ ;  $L = 128 \text{ Гн}$ ;  $w = 2,55 \text{ кДж/м}^3$ ;  $W = 0,64 \text{ Дж}$ .

4. На соленоид (см. условие и решение задачи 3) надето изолированное кольцо того же диаметра. Определить ЭДС индукции в кольце и ЭДС самоиндукции в соленоиде, если за 0,01 с ток в его обмотке равномерно снижается до нуля.

**Дано:**  $B = 1,7 \text{ Тл}$ ;  $D = 0,04 \text{ м}$ ;  $I_1 = 0,1 \text{ А}$ ;  $L = 128 \text{ Гн}$ ;  $\Delta t = 10^{-2} \text{ с}$ ;  $I_2 = 0$ .

**Найти:**  $\mathcal{E}_i$ ;  $\mathcal{E}_s$ .

**Решение.** По условию задачи, за время  $\Delta t = 0,01 \text{ с}$  сила тока в обмотке соленоида равномерно уменьшается от 0,1 А до нуля, поэтому магнитный поток, пронизывающий площадь кольца  $S =$

$= \pi D^2 / 4$ , уменьшается от  $\Phi_1 = BS$  до  $\Phi_2 = 0$ . ЭДС индукции, возникающая в кольце,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\Phi_1}{\Delta t} = \frac{B\pi D^2}{4\Delta t};$$

$$\mathcal{E}_i = \frac{1,7 \text{ Тл} \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{4 \cdot 10^{-2} \text{ с}} = 0,21 \text{ В.}$$

ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_s$ , возникающая в соленоиде при выключении тока в нем,  $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$ . Так как при выключении сила тока уменьшается до нуля равномерно, то

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I_2 - I_1}{\Delta t} = -\frac{I_1}{\Delta t}. \text{ Тогда}$$

$$\mathcal{E}_s = \frac{LI_1}{\Delta t}; \mathcal{E}_s = \frac{128 \text{ Гн} \cdot 0,1 \text{ А}}{0,01 \text{ с}} = 1280 \text{ В.}$$

**Ответ:**  $\mathcal{E}_i = 0,21 \text{ В}$ ;  $\mathcal{E}_s = 1280 \text{ В}$ .

5. Виток радиусом 5 см с током 1 А помещен в однородное магнитное поле напряженностью 5000 А/м так, что нормаль к витку составляет угол  $60^\circ$  с направлением поля. Какую работу совершают силы поля при повороте витка в устойчивое положение?

**Дано:**  $r = 0,05 \text{ м}$ ;  $I = 1 \text{ А}$ ;  $H = 5000 \text{ А/м}$ ;  $\alpha = 60^\circ$ .

**Найти:**  $A$ .

**Решение.** Работа  $A$  при повороте витка с током  $I$  в магнитном поле

$$A = I\Delta\Phi. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  — изменение магнитного потока сквозь площадь витка  $S = \pi r^2$ ;  $\Phi_1 = BS \cos \alpha$  — магнитный поток, пронизывающий виток в начальном положении, где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{B}$ .

Устойчивым положением витка в магнитном поле является такое, при котором направление нормали к нему совпадает с вектором индукции, т. е.  $\cos \alpha = 1$ . Следовательно,  $\Phi_2 = BS$ . Таким образом,  $\Delta\Phi = B\pi r^2(1 - \cos \alpha)$ . Учитывая, что  $B = \mu\mu_0 H$ , имеем

$$\Delta\Phi = \mu\mu_0 H\pi r^2(1 - \cos \alpha). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем

$$A = I\mu\mu_0 H\pi r^2(1 - \cos \alpha);$$

$$A = 1 \text{ А} \cdot 1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ А/м} \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2(1 - 0,5) = \\ = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $A = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ .

6. Математический маятник массой 20 г колебляется с амплитудой 5 см. Максимальная скорость маятника равна 15,7 см/с. Определить частоту, период и циклическую частоту колебаний,

длину нити, полную энергию и максимальное ускорение маятника.

**Дано:**  $m=2 \cdot 10^{-2}$  кг;  $A=0,05$  м;  $v_m=15,7 \cdot 10^{-2}$  м/с.

**Найти:**  $T$ ;  $v$ ;  $\omega$ ;  $t$ ;  $E$ ;  $a_m$ .

**Решение.** Уравнение гармонических колебаний маятника

$$s=A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $s$  — смещение маятника от положения равновесия;  $A$  — амплитуда колебаний;  $\omega=2\pi/T$  — циклическая частота;  $T$  — период колебания;  $t$  — время;  $\varphi_0$  — начальная фаза. Скорость колебаний

$$v=\frac{ds}{dt}=A\omega \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (2)$$

Из (2) следует, что  $v_m=A\omega$ , откуда

$$\omega=\frac{v_m}{A}=\frac{15,7 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}}{0,05 \text{ м}}=3,14 \text{ с}^{-1}.$$

Период и частота колебаний

$$T=2\pi/\omega; \quad T=2 \cdot 3,14/3,14 \text{ с}^{-1}=2 \text{ с}; \quad v=1/T; \quad v=1/2 \text{ с}^{-1}=0,5 \text{ Гц}.$$

Период колебаний математического маятника

$$T=2\pi\sqrt{l/g}, \quad (3)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $l$  — длина маятника. Из (3) получаем

$$l=gT^2/(4\pi)^2;$$

$$l=9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ с}^2/(4 \cdot 3,14^2)=1 \text{ м}.$$

Полная энергия маятника

$$E=mA^2\omega^2/2;$$

$$E=2 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 3,14^2 \text{ с}^2/2=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

Ускорение маятника

$$a=\frac{dv}{dt}=-A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Максимальное ускорение

$$a_m=A\omega^2; \quad a_m=5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 3,14^2 \text{ с}^{-2}=0,5 \text{ м/с}^2.$$

**Ответ:**  $T=2$  с;  $v=0,5$  Гц;  $\omega=3,14 \text{ с}^{-1}$ ;  $l=1$  м;  $E=2,5 \cdot 10^{-4}$  Дж;  $a_m=0,5 \text{ м/с}^2$ .

7. Плоская электромагнитная волна распространяется в среде ( $\epsilon=9$ ) и описывается уравнением  $H=2\cos 2\pi(2 \cdot 10^7 t - 0,2x)$ . Определить период и частоту колебаний, длину волны и скорость ее распространения, магнитную проницаемость среды.

**Дано:**  $\epsilon=9$ ;  $H=2\cos 2\pi(2 \cdot 10^7 t - 0,2x)$ .

**Найти:**  $T$ ;  $\lambda$ ;  $v$ ;  $\mu$ ;  $w$ .

**Решение.** Уравнение плоской электромагнитной волны

$$H=H_m \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где  $H_m$  — амплитуда колебаний вектора напряженности магнитного поля;  $T$  — период колебания;  $\lambda$  — длина волны;  $t$  — время;  $x$  — координата. Из сравнения (1) с уравнением, заданным в условии задачи, видно, что  $1/T=2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ,  $1/\lambda=0,2 \text{ м}^{-1}$ , откуда

$$T=\frac{1}{2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}}=5 \cdot 10^{-8} \text{ с}; \quad \lambda=\frac{1}{0,2 \text{ м}^{-1}}=5 \text{ м}.$$

Длина волны, частота, период и скорость волны связаны соотношениями  $v=\lambda/T$ ,  $v=1/T$ . Тогда  $v=5 \text{ м}/(5 \cdot 10^{-8} \text{ с})=1 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ;  $v=1/(5 \cdot 10^{-8} \text{ с})=2 \cdot 10^7 \text{ Гц}$ . Скорость электромагнитных волн связана с характеристиками среды  $\epsilon$  и  $\mu$  соотношением

$$v=\frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  и  $\mu$  — электрическая и магнитная проницаемости среды;  $c$  — скорость света в вакууме. Из (2) получаем

$$\mu=\frac{c^2}{\epsilon v^2}; \quad \mu=\frac{9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2}{9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2}=1.$$

**Ответ:**  $T=5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ;  $\lambda=5 \text{ м}$ ;  $v=1 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ;  $v=2 \cdot 10^7 \text{ Гц}$ ;  $\mu=1$ .

8. Для плоской электромагнитной волны по условию задачи 7 определить амплитудное значение напряженности электрического поля, среднюю по времени объемную плотность энергии и энергию, переносимую волной за 10 с через площадку 10 см<sup>2</sup>, перпендикулярную направлению распространения волны.

**Дано:**  $\mu=1$ ;  $\epsilon=9$ ;  $S=10 \text{ см}^2$ ;  $t=10 \text{ с}$ ;  $H=2\cos 2\pi(2 \cdot 10^7 t - 0,2x)$ .

**Найти:**  $E_m$ ;  $\langle w \rangle$ ;  $W$ .

**Решение.** В электромагнитной волне векторы  $E$  и  $H$  колеблются в одной фазе и модули их связаны соотношением

$$\sqrt{\epsilon\mu}E=V\mu\mu_0H. \quad (1)$$

Это соотношение справедливо и для амплитудных значений  $H_m$  и  $E_m$ . Из соотношения (1) получим

$$E_m=H_m \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}}; \quad E_m=2 \text{ А/м} \sqrt{\frac{1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}{9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}}}=250 \text{ В/м}.$$

Мгновенное значение объемной плотности энергии волны

$$w=1/2(\epsilon\epsilon_0E^2+\mu\mu_0H^2). \quad (2)$$

С учетом (1) получаем  $w=\epsilon\epsilon_0E^2=\mu\mu_0H^2$ . Среднее по времени значение объемной плотности

$$\langle w \rangle=\frac{1}{2}\mu\mu_0H_m^2;$$

$$\langle w \rangle=1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 2^2 \text{ А}^2/\text{м}^2 \cdot 0,5=2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/м}^3.$$

Энергия, переносимая волной через площадь  $S$  за время  $t$ ,

$$W = \langle w \rangle vSt;$$

$$W = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot 1 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 10 \text{ с} = 2,5 \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $E_m = 250 \text{ В/м}$ ;  $\langle \omega \rangle = 2,5 \text{ мкДж/м}^3$ ;  $W = 2,5 \text{ Дж.}$

9. Определить энергию, переносимую плоской синусоидальной электромагнитной волной, распространяющейся в вакууме, за 1 с сквозь поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Амплитуда напряженности электрического поля волны 5 мВ/м. Период волны  $T \ll t$ .

Дано:  $E_m = 5 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$ ;  $T \ll t$ ;  $S = 1 \text{ м}^2$ ;  $t = 1 \text{ с}$ .

Найти:  $W$ .

**Решение.** Плотность потока энергии (или интенсивность излучения) электромагнитных волн определяется вектором Пойнтинга  $P = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ , где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  — векторы напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. Учитывая, что  $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ , получаем

$$P = EH.$$

Так как  $E$  и  $H$  в каждой точке электромагнитной волны меняются во времени по закону синуса, находясь в одинаковых фазах, то мгновенное значение

$$P = E_m \sin \omega t H_m \sin \omega t = E_m H_m \sin^2 \omega t. \quad (1)$$

Таким образом,  $P$  является функцией времени. Согласно определению вектора плотности потока энергии имеем

$$P = \frac{1}{S} \frac{dW}{dt}, \quad (2)$$

где  $dW$  — энергия, переносимая волной через площадку  $S$  за время  $dt$ . Из выражений (2) и (1) следует, что

$$dW = PS dt = E_m H_m \sin^2 \omega t dt. \quad (3)$$

Для определения  $dW$  необходимо знать величину  $H_m$ , которая может быть найдена из соотношения  $\frac{1}{2} \epsilon_0 E_m^2 = \frac{1}{2} \mu_0 H_m^2$ , откуда

$$H_m = E_m \sqrt{\epsilon_0 / (\mu_0)}.$$

По условию,  $\epsilon = \mu = 1$ , тогда

$$H_m = E_m \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем

$$dW = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} E_m^2 S \sin^2 \omega t dt.$$

Энергия, переносимая волной за время  $t$ ,

$$W = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2 S \int_0^t \sin^2 \omega t dt = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2 S \left( \frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right).$$

По условию задачи,  $T \ll t$ , поэтому  $\frac{t}{2} \gg \frac{\sin 2\omega t}{4\omega}$  и членом  $\frac{\sin 2\omega t}{4\omega}$  можно пренебречь. Тогда

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2 S \frac{t}{2}; \\ W &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м}}{12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}} 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ В}^2/\text{м}^2 \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ с} = \\ &= 3,25 \cdot 10^{-8} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

**Ответ:**  $W = 3,25 \cdot 10^{-8} \text{ Дж.}$

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 4 (3)

1. Два бесконечно длинных прямолинейных проводника с токами 6 и 8 А расположены перпендикулярно друг другу. Определить индукцию и напряженность магнитного поля на середине кратчайшего расстояния между проводниками, равного 20 см.

2. По двум бесконечно длинным прямолинейным параллельным проводникам, расстояние между которыми 50 см, в одном направлении текут токи 5 и 10 А. Определить расстояние от проводника с меньшим током до геометрического места точек, в котором индукция магнитного поля равна нулю.

3. Решить задачу 2 для случая, когда токи текут в противоположных направлениях.

4. По двум бесконечно длинным прямолинейным параллельным проводникам текут токи 5 и 10 А в одном направлении. Геометрическое место точек, в котором индукция магнитного поля равна нулю, находится на расстоянии 10 см от проводника с меньшим током. Определить расстояние между проводниками.

5. По кольцевому проводнику радиусом 10 см течет ток 4 А. Параллельно плоскости кольцевого проводника на расстоянии 2 см над его центром проходит бесконечно длинный прямолинейный проводник, по которому течет ток 2 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в центре кольца. Рассмотреть все возможные случаи.

6. Два круговых витка с током лежат в одной плоскости и имеют общий центр. Радиус большого витка 12 см, меньшего 8 см. Напряженность поля в центре витков равна 50 А/м, если токи текут в одном направлении, и нулю, если в противоположном. Определить силы токов, текущих по круговым виткам.

7. Бесконечно длинный прямолинейный проводник с током 3 А расположен на расстоянии 20 см от центра витка радиусом

10 см с током 1 А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре витка для случаев, когда проводник: а) расположен перпендикулярно плоскости витка; б) параллелен плоскости витка.

8. По квадратной рамке со стороной 1 м течет ток 10 А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре рамки.

9. По квадратной рамке течет ток 10 А. Напряженность магнитного поля в центре рамки 2,25 А/м. Определить периметр рамки.

10. По квадратной рамке со стороной 1 м течет ток, который создает в центре рамки магнитное поле напряженностью 2,25 А/м. Определить силу тока в рамке.

11. Незакрепленный проводник массой 1 г и длиной 7,8 см находится в равновесии в горизонтальном магнитном поле напряженностью  $10^5$  А/м. Определить силу тока в проводнике, если он перпендикулярен линиям индукции поля.

12. Два параллельных бесконечно длинных проводника с токами 1 А взаимодействуют с силой 0,1 Н на 1 м их длины. На каком расстоянии находятся проводники?

13. Найти радиус траектории протона в магнитном поле с индукцией 1 Тл, если он движется перпендикулярно ему и обладает кинетической энергией 1 МэВ.

14. Какое ускорение приобретает проводник массой 1 г и длиной 8 см в однородном магнитном поле напряженностью 1 кА/м, если сила тока в нем 1 А, а направления тока и индукции взаимно перпендикулярны?

15. Электрон с энергией 300 эВ движется перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля напряженностью 465 А/м. Определить силу Лоренца, скорость и радиус траектории электрона.

16. Момент импульса протона в однородном магнитном поле напряженностью 20 кА/м равен  $6,6 \cdot 10^{-23}$  кг·м<sup>2</sup>/с. Найти кинетическую энергию протона, если он движется перпендикулярно линиям магнитной индукции поля.

17. На расстоянии 3 мм параллельно прямолинейному длинному проводнику движется электрон с кинетической энергией 500 эВ. Какая сила будет действовать на электрон, если по проводнику пустить ток 10 А?

18. Протон движется в магнитном поле напряженностью  $10^5$  А/м по окружности радиусом 2 см. Найти кинетическую энергию протона.

19. По прямолинейным длинным параллельным проводникам, находящимся на расстоянии 20 см, в одном направлении текут токи по 10 А. Какую работу на единицу длины проводников нужно совершить, чтобы раздвинуть их до расстояния 40 см?

20. Однородное магнитное поле напряженностью 225 А/м действует на помещенный в него проводник длиной 50 см с силой

$10^{-4}$  Н. Определить силу тока в проводнике, если угол между направлениями тока и индукции магнитного поля равен  $45^\circ$ .

21. Перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля индукцией 0,3 Тл движется проводник длиной 15 см со скоростью 10 м/с, перпендикулярной проводнику. Определить ЭДС, индуцируемую в проводнике.

22. Перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля индукцией 0,1 мТл по двум параллельным проводникам движется без трения перемычка длиной 20 см. При замыкании цепи, содержащей эту перемычку, в ней идет ток 0,01 А. Определить скорость движения перемычки. Сопротивление цепи 0,1 Ом.

23. На концах крыльев самолета размахом 15 м, летящего со скоростью 900 км/ч, возникает ЭДС индукции 0,15 В. Определить вертикальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

24. В плоскости, перпендикулярной однородному магнитному полю напряженностью  $1 \cdot 10^5$  А/м, вращается стержень длиной 0,8 м относительно оси, проходящей через его середину. В стержне индуцируется ЭДС, равная 0,1 В. Определить угловую скорость стержня.

25. 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.

26. Цепь состоит из соленоида и источника тока. Соленоид без сердечника длиной 15 см и диаметром 4 см имеет плотную намотку из двух слоев медного провода диаметром 0,2 мм. По соленоиду течет ток 0,5 А. Определить ЭДС самоиндукции в соленоиде в тот момент времени после отключения его от источника тока, когда сила тока умножилась в два раза. Сопротивлением источника тока и подводящих проводов пренебречь.

27. Решить задачу 26 для случая соленоида с сердечником, магнитная проницаемость которого равна 1000.

28. Сила тока в соленоиде равномерно возрастает от 0 до 10 А за 1 мин, при этом соленоид накапливает энергию 20 Дж. Какая ЭДС индуцируется в соленоиде?

29. Однослойный соленоид без сердечника длиной 20 см и диаметром 4 см имеет плотную намотку медным проводом диаметром 0,1 мм. За 0,1 с сила тока в нем равномерно убывает с 5 А до 0. Определить ЭДС индукции в соленоиде.

30. По условию задачи 29 определить заряд, прошедший через соленоид после его отключения.

31. Чему равна объемная плотность энергии магнитного поля в соленоиде без сердечника, имеющего плотную однослойную намотку проводом диаметром 0,1 мм, если по нему течет ток 0,1 А?

32. По условию задачи 31 найти энергию магнитного поля соленоида, если его длина 20 см, а диаметр 4 см.

**33.** По соленоиду длиной 0,5 м, имеющему число витков 250, течет ток 5 А. Площадь поперечного сечения 25 см<sup>2</sup>. В соленоид вставлен железный сердечник. Найти энергию магнитного поля соленоида. Зависимость  $B=f(H)$  дана на рис. 4.

**34.** Квадратная рамка со стороной 1 см содержит 100 витков и помещена в однородное магнитное поле напряженностью 100 А/м. Направление поля составляет угол 30° с нормалью к рамке. Какая работа совершается при повороте рамки на 30° в одну и другую сторону, если по ней течет ток 1 А?

**35.** По условию задачи 34 определить работу при повороте рамки в положение, при котором ее плоскость совпадает с направлением линий индукции поля.

**36.** Под действием однородного магнитного поля перпендикулярно линиям индукции начинает перемещаться прямолинейный проводник с силой тока 100 А и массой 20 г. Какой магнитный поток пересечет этот проводник к моменту времени, когда скорость его будет равна 10 м/с?

**37.** Проводник с током 1 А длиной 0,5 м равномерно вращается вокруг оси, проходящей через его конец, в плоскости, перпендикулярной линиям индукции магнитного поля напряженностью 100 А/м. За 1 мин вращения совершается работа 0,01 Дж. Определить угловую скорость вращения проводника.

**38.** Однородное магнитное поле, объемная плотность энергии которого 0,4 Дж/м<sup>3</sup>, действует на проводник, расположенный перпендикулярно линиям индукции, силой 0,01 Н на 1 см его длины. Определить силу тока в проводнике.

**39.** По обмотке соленоида с параметрами: число витков — 1000, длина — 0,5 м, диаметр — 4 см; течет ток 0,5 А. Зависимость  $B=f(H)$  для сердечника дана на рис. 4. Определить потокосцепление, энергию и объемную плотность энергии соленоида.

**40.** Обмотка соленоида имеет сопротивление 15 Ом. Какова его индуктивность, если при прохождении тока за 0,01 с в нем выделяется количество теплоты, эквивалентное энергии магнитного поля соленоида?

**41.** К пружине жесткостью 8 кН/м подведен груз, который колеблется с амплитудой 1,5 см. Определить максимальную кинетическую энергию груза.

**42.** Материальная точка, масса которой 4 г, колеблется с амплитудой 4 см и частотой 0,5 Гц. Какова скорость точки в положении, где смещение 2 см?

**43.** Амплитуда колебания груза, подвешенного на пружине, 2 см, максимальная кинетическая энергия 0,4 Дж. Определить жесткость пружины.

**44.** Уравнение гармонического колебания имеет вид  $s = -2\cos(150t + 0,5)$ . Определить амплитуду, частоту, период и начальную фазу колебания.

**45.** Для материальной точки массой 10 г определить полную энергию и максимальную возвращающую силу по условию задачи 44.

**46.** Определить циклическую частоту колебаний в электрическом колебательном контуре, если максимальная сила тока в катушке индуктивности 1 А, максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора 300 В, а энергия контура 0,15 мДж.

**47.** По условию задачи 46 определить период и частоту колебаний в контуре.

**48.** Через 0,25 мкс после включения колебательного контура энергия магнитного поля катушки стала равна энергии электрического поля конденсатора. Определить частоту колебаний, возникающих в контуре, если ток в катушке индуктивности изменяется по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ .

**49.** Материальная точка имеет наибольшее смещение 0,25 м и максимальную скорость 0,5 м/с. Написать уравнение гармонического колебания и определить максимальное ускорение точки.

**50.** Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 2,5 мГн и воздушного конденсатора емкостью 10 пФ. Во сколько раз изменится частота и период колебаний, если зазор между обкладками конденсатора заполнить бакелитом?

**51.** Уравнение плоской электромагнитной волны, распространяющейся в среде с  $\mu = 1$ , имеет вид  $E = 10 \sin(6,28 \cdot 10^8 t - 4,19x)$ . Определить диэлектрическую проницаемость среды, длину волны и скорость ее распространения.

**52.** По условию задачи 51 определить энергию, переносимую волной за 1 мин через площадку 100 см<sup>2</sup>, перпендикулярную направлению распространения волны.

**53.** Плоская электромагнитная волна  $E = 100 \sin(6,28 \cdot 10^8 t + 4,55x)$  распространяется в веществе. Определить диэлектрическую проницаемость вещества, если  $\mu = 1$ .

**54.** По условию задачи 53 определить энергию, переносимую волной за 30 с через площадку 10 см<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

**55.** Уравнение плоской механической волны, распространяющейся в упругой среде, имеет вид  $s = 1 \cdot 10^{-8} \sin(6280t - 1,256x)$ . Определить длину волны и скорость ее распространения.

**56.** По условию задачи 55 определить, для какого момента времени смещение точки, удаленной на 1 м от источника колебания в направлении распространения волны, равно половине амплитуды.

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

**58.** В среде ( $\epsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ) распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля 100 В/м. На ее пути перпендикулярно направлению распространения расположена поглощающая поверхность, имеющая форму круга радиусом 0,5 м. Какую энергию поглотит эта поверхность за 1 мин? Период волны  $T \ll t$ .

59. Определить энергию, которую переносит за 0,5 мин плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в воздухе, сквозь площадку 10 см<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно направлению распространения. Амплитуда индукции магнитного поля волны 3,33 пТл. Период волны  $T \ll t$ .

60. В среде ( $\epsilon=6$ ,  $\mu=1$ ) распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля 0,65 А/м. Определить энергию, переносимую этой волной за время 1 мин сквозь площадку 50 см<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Период волны  $T \ll t$ .

## V. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

### ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

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

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

Рассматривая явление дифракции, необходимо уяснить метод зон Френеля, уметь пользоваться графическим методом сложения амплитуд, что будет способствовать пониманию дифракции на одной щели, дифракционной решетке. Кроме того, необходимо изучить дифракцию на пространственной решетке и уметь пользоваться формулой Вульфа — Брэггов, являющейся основной в рентгеноструктурном анализе, имеющей важнейшее практическое применение.

Изучение явлений интерференции и дифракции света должно подготовить студента к пониманию основ волновой (квантовой) механики и физики твердого тела.

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

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

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

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

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

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

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

В итоге изучения этого раздела у студента должно сформироваться представление, что электромагнитное излучение имеет двойственную корpusкулярно-волновую природу (корпускулярно-волновой дуализм). Корпускулярно-волновой дуализм — проявление взаимосвязи двух основных форм материи: вещества и поля.

Контрольная работа № 5 построена так, что позволяет проверить знания студентов по разделу «Волновая оптика и квантовая природа излучения». В нее включены задачи на расчет картины интерференции от двух когерентных источников, интерференцию в тонких пленках, полосы равной толщины и равного наклона. Тема «Дифракция света» представлена задачами: дифракция в параллельных лучах на одной щели, на плоской и пространственной дифракционных решетках.

Задачи по теме «Поляризация света» охватывают такие вопросы, как применение законов Брюстера, Малюса, использование формул Френеля для определения степени поляризации, вращение плоскости поляризации в растворах и кристаллах.

Задачи на дисперсию и поглощение света затрагивают такие вопросы, как определение фазовой и групповой скорости, эффект Вавилова — Черенкова.

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

### ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Оптическая разность хода

$$\Delta = s_2 n_2 - s_1 n_1$$

Условие интерференционного максимума

$$\Delta = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Условие интерференционного минимума

$$\Delta = \pm (2m - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots)$$

Ширина интерференционных полос в опыте Юнга

$$\Delta x = \frac{\lambda}{d}$$

Оптическая разность хода в тонких пленках в проходящем и отраженном свете

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i}$$

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

Радиусы светлых и темных колец Ньютона в проходящем свете (или темных и светлых — в отраженном)

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

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

$$(m = 1, 2, \dots)$$

Радиусы зон Френеля для сферического и плоского волнового фронта

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

$$(m = 1, 2, \dots)$$

Направления дифракционных максимумов и минимумов от одной щели

$$\varphi_0 = 0,$$

$$a \sin \varphi_m = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$(m = 1, 2, \dots),$$

$$a \sin \varphi_m = \pm m\lambda (m = 1, 2, \dots)$$

$$c \sin \varphi_m = \pm m\lambda (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Направления главных максимумов дифракционной решетки

Разрешающая способность дифракционной решетки

Формула Вульфа — Брэггов

Степень поляризации

Закон Брюстера

Закон Малюса

Угол поворота плоскости поляризации света в кристаллах и растворах

Фазовая скорость света

Груповая скорость света

Дисперсия вещества

Направление излучения Бавилова — Черенкова

Закон Стефана — Больцмана

Закон смещения Вина

Давление света при нормальном падении на поверхность

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$$

$$2d \sin \theta_m = m\lambda (m = 1, 2, \dots)$$

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$$

$$\tan i_0 = n_2/n_1$$

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

$$\varphi = acl$$

$$\varphi = al,$$

$$v = c/n$$

$$u = \frac{c}{n} \left( 1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

$$D = \frac{dn}{d\lambda}$$

$$\cos \theta = \frac{c}{nV}$$

$$R_T = \sigma T^4$$

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

$$p = \frac{I}{c} (1 + \rho) = w (1 + \rho)$$

$$\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$h\nu = A + E_k$$

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Изменение длины волны при эффекте Комптона

Комптоновская длина волны

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Для устранения отражения света от поверхности линзы на нее наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления 1,25, меньшим, чем у стекла (просветление оптики). При какой наименьшей толщине пленки отражение света с длиной

волны 0,72 мкм не будет наблюдаться, если угол падения лучей  $60^\circ$ .

Дано:  $n = 1,25$ ;  $\lambda = 0,72$  мкм;  $i = 60^\circ$ .

Найти:  $d_{\min}$ .

Решение. Оптическая разность хода лучей, отраженных от нижней и верхней поверхностей пленки (рис. 5),

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

где  $d$  — толщина пленки;  $n$  — показатель преломления пленки;  $i$  — угол падения лучей. В выражении (1) учтено, что отражение лучей на обеих поверхностях происходит от оптически более плотной среды и поэтому потеря полуволны в обоих случаях компенсируют друг друга. Условие интерференционного минимума

$$\Delta = \pm (2m - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (2)$$

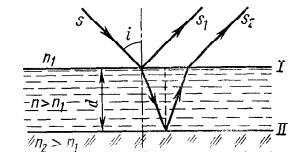


Рис. 5

где  $\lambda$  — длина волны света. Подставляя (1) в (2) и учитывая, что выражение (1) положительно, получаем

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m - 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Из (3) найдем возможные значения толщины пленки:

$$d = \frac{(2m - 1) \lambda}{4 \sqrt{n^2 - \sin^2 i}}. \quad (4)$$

Наименьшая толщина пленки наблюдается при  $m = 1$ :

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{n^2 - \sin^2 i}};$$

$$d_{\min} = \frac{0,72 \cdot 10^{-8} \text{ м}}{4 \sqrt{(1,25)^2 - \sin^2 60^\circ}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,2 \text{ мкм}.$$

Ответ:  $d_{\min} = 0,2$  мкм.

2. Постоянная дифракционной решетки 10 мкм, ее ширина 2 см. В спектре какого порядка эта решетка может разрешить дублет  $\lambda_1 = 486,0$  нм и  $\lambda_2 = 486,1$  нм?

Дано:  $c = 10$  мкм;  $l = 2$  см;  $\lambda_1 = 486,0$  нм;  $\lambda_2 = 486,1$  нм.

Найти:  $m$ .

Решение. Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN, \quad (1)$$

где  $\Delta\lambda$  — минимальная разность длин волн двух спектральных линий  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$ , разрешаемых решеткой;  $m$  — порядок спектра;

$N$  — число щелей решетки. Так как постоянная решетки  $c$  есть расстояние между серединами соседних щелей, то

$$N = \frac{l}{c}, \quad (2)$$

где  $l$  — ширина решетки. Из формулы (1) с учетом (2) находим

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{mN} = \frac{c\lambda}{ml}. \quad (3)$$

Дублет спектральных линий  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  будет разрешен, если

$$\Delta\lambda \leq \lambda_2 - \lambda_1. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), с учетом того, что  $\lambda = \lambda_1$ , получаем

$$\frac{c\lambda_1}{ml} \leq \lambda_2 - \lambda_1. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что дублет  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  будет разрешен во всех спектрах с порядком

$$m \geq \frac{c\lambda_1}{l(\lambda_2 - \lambda_1)}.$$

Проводя вычисления, получаем

$$\frac{c\lambda_1}{l(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 486,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot (486,1 - 486,0) \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 2,43.$$

Так как  $m$  — целое число, то  $m \geq 3$ .

Ответ:  $m \geq 3$ .

3. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Степень поляризации преломленного光луча составляет 0,124. Найти коэффициент пропускания света.

Дано:  $p'' = 0,124$ .

Найти:  $\tau$ .

Решение. Естественный свет можно представить как наложение двух некогерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность

$$I_{\parallel} = I_{\perp}, \quad (1)$$

где индексы  $\parallel$  и  $\perp$  обозначают колебания, параллельные и перпендикулярные плоскости падения света на поверхность диэлектрика, причем интенсивность падающего света

$$I = I_{\parallel} + I_{\perp}. \quad (2)$$

При падении света под углом полной поляризации отражаются только волны, поляризованные в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. В преломленной волне преобладают колебания, параллельные плоскости падения. Интенсивность преломленной волны

$$I'' = I_{\parallel} + I_{\perp}. \quad (3)$$

### Составляющие интенсивности преломленной волны

$$I'_{\parallel} = I_{\parallel}, \quad I'_{\perp} = I_{\perp} - I', \quad (4)$$

где  $I'$  — интенсивность отраженного света. Степень поляризации преломленного луча

$$p'' = \frac{I''_{\max} - I''_{\min}}{I''_{\max} + I''_{\min}} = \frac{I'_{\parallel} - I'_{\perp}}{I'_{\parallel} + I'_{\perp}} = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I''}. \quad (5)$$

С учетом равенств (4) и (1) выражение (5) можно представить в виде

$$p'' = \frac{I'}{I''}. \quad (6)$$

Коэффициент пропускания света

$$\tau = \frac{I''}{I} = \frac{I''}{I' + I''} \quad (7)$$

или с учетом выражения (6)

$$\tau = \frac{1}{1 + p''}.$$

Проводя вычисления, получаем

$$\tau = \frac{1}{1 + 0,124} = 0,89.$$

Ответ:  $\tau = 0,89$ .

4. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор, уменьшилась в 2,3 раза. Во сколько раз она уменьшится, если за первым поставить второй такой же поляризатор так, чтобы угол между их главными плоскостями был равен  $60^\circ$ ?

Дано:  $I_0/I_1 = 2,3$ ;  $\alpha = 60^\circ$ .

Найти:  $I_0/I_2$ .

Решение. Естественный свет можно представить как наложение двух некогерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность. Идеальный поляризатор пропускает колебания, параллельные его главной плоскости, и полностью задерживает колебания, перпендикулярные этой плоскости. На выходе из первого поляризатора получается плоскополяризованный свет, интенсивность которого с учетом потерь на отражение и поглощение света поляризатором равна

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k), \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность естественного света;  $k$  — коэффициент, учитывающий потери на отражение и поглощение. После прохождения второго поляризатора интенсивность света уменьшается как за счет отражения и поглощения света поляризатором, так и из-за несовпадения плоскости поляризации света с главной

плоскостью поляризатора. В соответствии с законом Малюса и с учетом потерь на отражение и поглощении света эта интенсивность равна

$$I_2 = I_1(1-k)\cos^2\alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол между плоскостью поляризации света, которая параллельна главной плоскости первого поляризатора, и главной плоскостью второго поляризатора. Найдем во сколько раз уменьшилась интенсивность света:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1(1-k)\cos^2\alpha}. \quad (3)$$

Из выражения (1) найдем

$$(1-k) = \frac{2I_1}{I_0}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{I_2} &= \frac{1}{2\cos^2\alpha} \left(\frac{I_0}{I_1}\right)^2; \\ \frac{I_0}{I_2} &= \frac{1}{2\cos^2 60^\circ} (2,3)^2 = 10,6. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $I_0/I_2 = 10,6$ .

5. Измерение показателя преломления оптического стекла дало  $n_1 = 1,528$  для  $\lambda_1 = 0,434$  мкм и  $n_2 = 1,523$  для  $\lambda_2 = 0,486$  мкм. Вычислить отношение групповой скорости к фазовой для света с длиной волны 0,434 мкм.

**Дано:**  $\lambda_1 = 0,434$  мкм;  $n_1 = 1,528$ ;  $\lambda_2 = 0,486$  мкм;  $n_2 = 1,523$ .

**Найти:**  $u_1/v_1$ .

**Решение.** Зависимость групповой скорости  $u$  от показателя преломления  $n$  и длины волны  $\lambda$  имеет вид

$$u = \frac{c}{n} \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Фазовая скорость

$$v = \frac{c}{n}. \quad (2)$$

Разделив выражение (1) на (2), получим

$$\frac{u}{v} = 1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (3)$$

Для длины волны  $\lambda_1$  и средней дисперсии  $\left\langle \frac{dn}{d\lambda} \right\rangle = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$  имеем

$$\frac{u_1}{v_1} = 1 + \frac{\lambda_1}{n_1} \left( \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right).$$

Проводя вычисления, получаем

$$\frac{u_1}{v_1} = 1 + \frac{0,434 \cdot 10^{-6} \text{ м} (1,523 - 1,528)}{1,528 \cdot (0,486 - 0,434) \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 0,973.$$

**Ответ:**  $u_1/v_1 = 0,973$ .

6. В черенковском счетчике из каменной соли релятивистские протоны излучают в конусе с раствором  $82^\circ$ . Определить кинетическую энергию протонов. Показатель преломления каменной соли 1,54.

**Дано:**  $2\theta = 82^\circ$ ;  $n = 1,54$ .

**Найти:**  $E_k$ .

**Решение.** Излучение Вавилова — Черенкова возникает, когда скорость движения  $V$  заряженной частицы в среде больше фазовой скорости  $v = c/n$  света в этой среде ( $c$  — скорость света в вакууме,  $n$  — показатель преломления среды). Излучение направлено вдоль образующих конуса, ось которого совпадает с направлением движения частицы (рис. 6), а угол  $2\theta$  при вершине определяется из формулы

$$\cos \theta = \frac{c}{nV}. \quad (1)$$

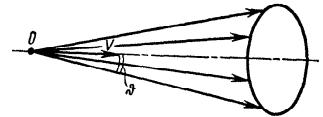


Рис. 6

Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$E_k = E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1-(V/c)^2}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $E_0 = m_0 c^2$  — энергия покоя частицы;  $m_0$  — масса покоя. Для протонов  $E_0 = 938$  МэВ. Отношение  $V/c$  определим из (1):

$$\frac{V}{c} = \frac{1}{n \cos \theta}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем

$$\begin{aligned} E_k &= E_0 \left( \frac{n \cos \theta}{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta - 1}} - 1 \right); \\ E_k &= 938 \text{ МэВ} \left( \frac{1,54 \cos 41^\circ}{\sqrt{(1,54 \cos 41^\circ)^2 - 1}} - 1 \right) = 900 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $E_k = 900$  МэВ.

7. Во сколько раз увеличится мощность излучения черного тела, если максимум энергии излучения сместится от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе?

**Дано:**  $\lambda_{\text{к}} = 0,76$  мкм;  $\lambda_{\text{ф}} = 0,38$  мкм.

**Найти:**  $N_{\text{ф}}/N_{\text{к}}$ .

**Решение.** Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения черного тела, согласно закону смещения Вина, равна

$$\lambda_{\max} = b/T, \quad (1)$$

где  $T$  — термодинамическая температура тела;  $b$  — постоянная Вина. Из формулы (1) определяем температуру, при которой максимум энергии излучения приходится на красную  $\lambda_k$  и фиолетовую  $\lambda_\phi$  границы видимого спектра:

$$T_k = b/\lambda_k, \quad T_\phi = b/\lambda_\phi. \quad (2)$$

Мощность излучения

$$N = R_T S, \quad (3)$$

где  $R_T$  — энергетическая светимость тела;  $S$  — площадь его поверхности. В соответствии с законом Стефана — Больцмана

$$R_T = \sigma T^4, \quad (4)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана. Для температур  $T_k$  и  $T_\phi$

$$N_k = \sigma T_k^4 S \text{ и } N_\phi = \sigma T_\phi^4 S. \quad (5)$$

Из формул (5) находим

$$\frac{N_\phi}{N_k} = \left( \frac{T_\phi}{T_k} \right)^4 \quad (6)$$

или с учетом (2) имеем

$$\frac{N_\phi}{N_k} = \left( \frac{\lambda_k}{\lambda_\phi} \right)^4; \quad \frac{N_\phi}{N_k} = \left( \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}} \right)^4 = 16.$$

Ответ:  $N_\phi/N_k = 16$ .

8. Давление света (длина волны 0,55 мкм), нормально падающего на зеркальную поверхность, равно 9 мкПа. Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности.

Дано:  $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$  м;  $p = 9 \cdot 10^{-6}$  Па;  $\rho = 1$ .

Найти:  $n$ .

**Решение.** Давление света при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения  $\rho$

$$p = \frac{I}{c} (1 + \rho) = w (1 + \rho), \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность излучения,  $c$  — скорость света в вакууме;  $w = I/c$  — объемная плотность энергии излучения.

Энергия одного фотона  $e = hc/\lambda$ , где  $h$  — постоянная Планка. Объемная плотность энергии излучения

$$w = nhc/\lambda, \quad (2)$$

где  $n$  — концентрация фотонов.

Подставляя (2) в (1), получаем

$$p = \frac{nhc}{\lambda} (1 + \rho), \quad (3)$$

откуда

$$n = \frac{\lambda p}{hc (1 + \rho)}; \\ n = \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ Па}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} (1 + 1)} = 2,49 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}.$$

Ответ:  $n = 2,49 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ .

9. Красная граница фотоэффекта для никеля равна 0,257 мкм. Найти длину волны света, падающего на никелевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 1,5 В.

Дано:  $\lambda_k = 0,257 \text{ мкм}$ ;  $U = 1,5 \text{ В}$ .

Найти:  $\lambda$ .

**Решение.** Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта,

$$hc/\lambda = A + E_k, \quad (1)$$

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:

$$hc/\lambda_k = A. \quad (2)$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

$$E_k = eU, \quad (3)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $U$  — задерживающая разность потенциалов. Подставляя выражения (2) и (3) в (1), получаем

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_k} + eU. \quad (4)$$

Из уравнения (4) найдем длину волны света:

$$\lambda = \left( \frac{1}{\lambda_k} + \frac{eU}{hc} \right)^{-1}; \\ \lambda = \left( \frac{1}{0,257 \cdot 10^{-6} \text{ м}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,5 \text{ В}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \right)^{-1} = \\ = 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,196 \text{ мкм}.$$

Ответ:  $\lambda = 0,196 \text{ мкм}$ .

10. Гамма-фотон с длиной волны 1,2 пм в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на угол  $60^\circ$ . Определить кинетическую

энергию и импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покончился.

**Дано:**  $\lambda_1 = 1,2 \cdot 10^{-12}$  м;  $\vartheta = 60^\circ$ .

**Найти:**  $E_k$ ;  $p$ .

**Решение.** Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии на неподвижном свободном электроне

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_c (1 - \cos \vartheta), \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн падающего и рассеянного фотонов;  $\vartheta$  — угол рассеяния фотона (рис. 7);  $\lambda_c = h/(m_0c) = hc/E_0$  — комптоновская длина волны электрона:  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света в вакууме;  $m_0$  и  $E_0 = m_0c^2$  — масса и энергия покоя электрона. Из выражения (1) найдем

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos \vartheta). \quad (2)$$

Выразим энергию падающего и рассеянного фотона через его длину волны:

$$E_1 = \frac{hc}{\lambda_1}, \quad E_2 = \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{hc}{\lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos \vartheta)}. \quad (3)$$

Кинетическая энергия электрона отдачи, согласно закону сохранения энергии, равна

$$E_k = E_1 - E_2. \quad (4)$$

Подставляя выражение (3) в (4), находим

$$\begin{aligned} E_k &= \left( \frac{hc}{\lambda_1} \right) \frac{\lambda_c (1 - \cos \vartheta)}{\lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos \vartheta)} - E_0 \left( \frac{\lambda_c}{\lambda_1} \right) \frac{\lambda_c (1 - \cos \vartheta)}{\lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos \vartheta)}; \\ E_k &= 0,511 \text{ МэВ} \left( \frac{2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}}{1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}} \right) \times \\ &\times \frac{2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} (1 - \cos 60^\circ)}{1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м} + 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} (1 - \cos 60^\circ)} = \\ &= 0,492 \text{ МэВ} = 0,787 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Зная кинетическую энергию электрона, найдем его импульс. Поскольку кинетическая энергия электрона сравнима с его энергией покоя, импульс и кинетическая энергия связаны релятивистским соотношением:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k(E_k + 2E_0)};$$

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \sqrt{0,787 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} (0,787 + 2 \cdot 0,818) \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} = \\ &= 4,6 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $E_k = 0,492 \text{ МэВ}$ ;  $p = 4,6 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

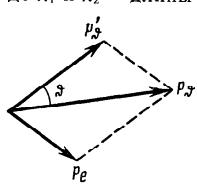


Рис. 7

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 5 (4)

1. Расстояние между двумя когерентными источниками 1,1 мм, а расстояние от источников до экрана 2,5 м. Источники испускают монохроматический свет с длиной волны 0,55 мкм. Определить число интерференционных полос, приходящихся на 1 см длины экрана.

2. В опыте Юнга одна из щелей перекрывалась прозрачной пластинкой толщиной 10 мкм, вследствие чего центральная светлая полоса сместилась в положение, первоначально занятое восьмой светлой полосой. Найти показатель преломления пластиинки, если длина волны света 0,6 мкм.

3. На мыльную пленку падает белый свет под углом  $60^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в красный цвет ( $\lambda = 0,65$  мкм)? Показатель преломления мыльной воды 1,33.

4. На пленку из глицерина толщиной 0,3 мкм падает белый свет. Каким будет казаться цвет пленки в отраженном свете, если угол падения лучей  $45^\circ$ ?

5. Для устранения отражения света на поверхность стеклянной линзы наносится пленка вещества с показателем преломления 1,2, меньшим, чем у стекла. При какой наименьшей толщине этой пленки отражение света с длиной волны 0,6 мкм не будет наблюдаваться, если свет падает нормально?

6. На тонкий стеклянный клин падает нормально свет с длиной волны 0,6 мкм. Расстояние между соседними интерференционными полосами в отраженном свете равно 0,5 мм. Показатель преломления стекла 1,5. Определить угол между поверхностями клина.

7. На тонкий стеклянный клин падает нормально монохроматический свет. Наименьшая толщина клина, с которой видны интерференционные полосы в отраженном свете, равна 0,1 мкм. Расстояние между полосами 2 мм. Найти угол между поверхностями клина.

8. Кольца Ньютона образуются между плоским стеклом и линзой с радиусом кривизны 12,1 м. Монохроматический свет падает нормально. Диаметр второго светлого кольца в отраженном свете равен 6,6 мм. Найти длину волны падающего света.

9. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. Длина волны света 0,5 мкм. Найти радиус кривизны линзы, если диаметр пятого светлого кольца в проходящем свете равен 10 мм.

10. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью. Определить показатель преломления жидкости, если диаметр третьего темного кольца в отраженном свете равен 7 мм. Свет с длиной волны 0,6 мкм падает нормально. Радиус кривизны линзы 10 м.

11. Свет от монохроматического источника ( $\lambda=0,6$  мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром 1,2 мм. Темным или светлым будет центр дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии 0,3 м от диафрагмы?

12. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии 1 м от точечного источника монохроматического света ( $\lambda=0,5$  мкм). Посередине между экраном и источником света помещена диафрагма с круглым отверстием. При каком наименьшем радиусе отверстия центр дифракционной картины будет темным?

13. На щель шириной 0,2 мм падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм. Найти расстояние между первыми дифракционными минимумами на экране, удаленном от щели на 0,5 м.

14. На узкую щель нормально падает плоская монохроматическая световая волна ( $\lambda=628$  нм). Чему равна ширина щели, если второй дифракционный максимум наблюдается под углом  $1^{\circ}30'$ ?

15. Постоянная дифракционной решетки равна 2,5 мкм. Определить наибольший порядок спектра, общее число главных максимумов в дифракционной картине и угол дифракции в спектре третьего порядка при нормальном падении монохроматического света с длиной волны 0,59 мкм.

16. На дифракционную решетку с периодом 4,8 мкм падает нормально свет. Какие спектральные линии, соответствующие длинам волн, лежащим в пределах видимого спектра, будут совпадать в направлении  $\phi=30'$ ?

17. Чему должна быть равна ширина дифракционной решетки с периодом 20 мкм, чтобы в спектре первого порядка был разрешен дублет  $\lambda_1=404,4$  нм и  $\lambda_2=404,7$  нм?

18. Какую разность длин волн может разрешить дифракционная решетка шириной 2 см и периодом 5 мкм в области красных лучей ( $\lambda=0,7$  мкм) в спектре второго порядка?

19. На грань кристалла каменной соли падает узкий пучок рентгеновских лучей ( $\lambda=0,15$  нм). Под каким углом к поверхности кристалла должны падать лучи, чтобы наблюдался дифракционный максимум первого порядка? Расстояние между атомными плоскостями кристалла равно 0,285 нм.

20. Расстояние между атомными плоскостями кристалла кальция равно 0,3 нм. Определить, при какой длине волны рентгеновского излучения второй дифракционный максимум будет наблюдаваться при отражении лучей под углом  $30^{\circ}$  к поверхности кристалла.

21. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы свет, отраженный от поверхности воды, был максимально поляризован?

22. Естественный свет падает на кристалл алмаза под углом полной поляризации. Найти угол преломления света.

23. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Коэффициент отражения света равен 0,095. Найти степень поляризации преломленного луча.

24. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Коэффициент пропускания света равен 0,915. Найти степень поляризации преломленного луча.

25. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Степень поляризации преломленного луча составляет 0,105. Найти коэффициент отражения света.

26. Естественный свет проходит через два поляризатора, угол между главными плоскостями которых равен  $45^{\circ}$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения этой системы? Считать, что каждый поляризатор отражает и поглощает 10% падающего на них света.

27. Чему равен угол между главными плоскостями двух поляризаторов, если интенсивность естественного света, прошедшего через них, уменьшилась в 5,4 раза? Считать, что каждый поляризатор отражает и поглощает 14% падающего на них света.

28. Естественный свет проходит через два поляризатора, угол между главными плоскостями которых  $60^{\circ}$ . Во сколько раз изменится интенсивность света, прошедшего эту систему, если угол между плоскостями поляризаторов уменьшить в два раза?

29. Кварцевую пластинку толщиной 3 мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между двумя поляризаторами. Определить постоянную вращения кварца для красного света, если его интенсивность после прохождения этой системы максимальна, когда угол между главными плоскостями поляризаторов  $45^{\circ}$ .

30. Раствор сахара с концентрацией  $0,25$  г/см<sup>3</sup> толщиной 20 см поворачивает плоскость поляризации монохроматического света на угол  $33^{\circ}20'$ . Другой раствор толщиной 15 см поворачивает плоскость поляризации этого же света на угол  $20^{\circ}$ . Определить концентрацию сахара во втором растворе.

31. Вычислить групповую и фазовую скорости света с длиной волны 656,3 нм в воде, если известно, что показатель преломления для этой длины волны равен 1,3311, а для волны длиной 643,8 нм он равен 1,3314.

32. Найти отношение групповой скорости к фазовой для света с длиной волны 0,5 мкм в среде с показателем преломления 1,5 и дисперсией  $-3 \cdot 10^4$  м<sup>-1</sup>.

33. Вычислить разность между фазовой и групповой скоростями для света с длиной волны 0,656 мкм в стекле, если известно, что показатель преломления для этой длины волны равен 1,514, а для волны длиной 0,768 мкм он равен 1,511.

34. Определить относительное отклонение групповой скорости от фазовой для света с длиной волны 0,6 мкм в среде с показателем преломления 1,6 и дисперсией  $-4 \cdot 10^4$  м<sup>-1</sup>.

35. Найти отношение фазовой скорости к групповой для света с длиной волны 0,589 мкм в сероуглероде, если известно, что

показатель преломления для этой длины волны равен 1,629, а для волны длиной 0,656 мкм он равен 1,620.

36. В черенковском счетчике, заполненном глицерином, пучок релятивистских протонов излучает свет в конусе с раствором 88°. Определить, во сколько раз скорость протонов больше фазовой скорости света в глицерине.

37. Какой кинетической энергией должны обладать электроны, чтобы при их движении в сероуглероде наблюдалось черенковское свечение?

38. Пучок релятивистских протонов движется в среде с показателем преломления 1,5. Будет ли наблюдаться черенковское свечение, если кинетическая энергия протонов 300 МэВ?

39. В черенковском счетчике, заполненном водой, пучок релятивистских электронов излучает свет в конусе с раствором 80°. Определить кинетическую энергию электронов.

40. В черенковский счетчик из каменной соли влетает пучок релятивистских протонов с кинетической энергией 1,5 ГэВ. Определить угол раствора конуса излучения света.

41. Определить длину волны, отвечающую максимуму испускательной способности черного тела при температуре 37°C, и энергетическую светимость тела.

42. Максимум испускательной способности Солнца приходится на длину волны 0,5 мкм. Считая, что Солнце излучает как черное тело, определить температуру его поверхности и мощность излучения.

43. Считая, что Солнце излучает как черное тело, определить интенсивность солнечного излучения вблизи Земли. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К.

44. Считая, что Солнце излучает как черное тело, вычислить насколько уменьшается масса Солнца за секунду вследствие излучения. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К.

45. Вычислить температуру поверхности Земли, считая ее постоянной, в предположении, что Земля как черное тело излучает столько же энергии, сколько получает от Солнца. Интенсивность солнечного излучения вблизи Земли 1,37 кВт/м<sup>2</sup>.

46. Определить давление солнечных лучей, нормально падающих на зеркальную поверхность. Интенсивность солнечного излучения, нормально падающего на черную поверхность.

47. Плотность потока энергии в импульсе излучения лазера может достигать 10<sup>20</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Определить давление такого излучения, нормально падающего на черную поверхность.

48. Свет с длиной волны 0,4 мкм нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление 6 мкПа. Определить число фотонов, ежесекундно падающих на 1 см<sup>2</sup> этой поверхности.

49. Давление света с длиной волны 0,6 мкм, падающего нормально на черную поверхность, равно 2 мкПа. Определить число фотонов, падающих за секунду на 1 см<sup>2</sup> этой поверхности.

90

50. Давление света, нормально падающего на поверхность, 3 мкПа. Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности, если длина волны света 0,45 мкм, а коэффициент отражения 0,36.

51. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вылетающих из вольфрамового электрода, освещаемого ультрафиолетовым светом с длиной волны 0,2 мкм.

52. Катод вакуумного фотоэлемента освещается светом с длиной волны 0,405 мкм. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 1,2 В. Найти работу выхода электронов из катода.

53. Максимальная кинетическая энергия фотозелектронов при освещении цинкового электрода монохроматическим светом 0,26 эВ. Вычислить длину волны света, применявшегося при освещении.

54. Красной границе фотоэффекта для алюминия соответствует длина волны 0,332 мкм. Найти длину волны монохроматической световой волны, падающей на алюминиевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 1 В.

55. Найти задерживающую разность потенциалов для фотоэлектронов, испускаемых при освещении цезиевого электрода ультрафиолетовым излучением с длиной волны 0,3 мкм.

56. В результате комптоновского рассеяния на свободном электроне длина волны гамма-фотона увеличилась в два раза. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, если угол рассеяния фотона равен 60°. До столкновения электрон покоялся.

57. Гамма-фотон с энергией 0,51 МэВ испытал комптоновское рассеяние на свободном электроне строго назад. Определить кинетическую энергию электрона отдачи. До столкновения электрон покоялся.

58. Гамма-фотон с энергией 1,02 МэВ в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на угол 90°. Определить импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоялся.

59. В результате комптоновского рассеяния на свободном электроне энергия гамма-фотона уменьшилась в два раза. Угол рассеяния фотона равен 60°. Найти импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоялся.

60. Первоначально покоявшийся свободный электрон в результате комптоновского рассеяния на нем гамма-фотона с энергией 0,51 МэВ приобрел кинетическую энергию, равную 0,17 МэВ. Чему равен угол рассеяния фотона?

## VI. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

### ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

Изучение этого раздела следует начать с элементов квантовой механики и рассмотреть такие вопросы, как корпускулярно-волновой дуализм материи, гипотезу де Бойля, уясняется, что движение любой частицы, согласно этой гипотезе, всегда сопровождается волновым процессом. Исходя из соотношений неопределенности Гейзенберга, определять границы применимости классической механики и понять, что из этих соотношений вытекает необходимость описания состояния микрочастиц с помощью волновой функции, обратить внимание на ее статистический смысл. Целесообразно рассмотреть применение уравнений Шредингера к стационарным состояниям (прямоугольная потенциальная яма бесконечной глубины), следует знать правила квантования энергии, орбитального момента импульса в атоме водорода и выяснить смысл трех квантовых чисел. При изучении темы «Периодическая система элементов» необходимо обратить внимание на физический смысл спинового числа и принцип запрета Паули, на основе которого рассмотреть распределение электронов в атоме по состояниям.

При изучении темы «Элементы физики твердого тела» основное внимание должно быть удалено: элементам теории кристаллической решетки, элементам зонной теории твердых тел, полупроводникам, проводникам (металлам). Рассматривая эти вопросы, существенно понять характер теплового движения в твердых телах, дебаевскую теорию теплопроводности, распределение электронов по энергиям при  $T=0$  К и  $T>0$  К, иметь качественное представление о сверхпроводимости, выяснить различия между металлами, диэлектриками и полупроводниками, рассмотреть собственную и примесную проводимости полупроводников и вольт-амперную характеристику  $p-n$ -перехода.

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

В процессе изучения радиоактивного распада ядер важно понять дискретный характер энергетического спектра  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -излучения, свидетельствующий о квантованиях энергии ядер; понять закономерности  $\beta$ -распада, связанного с законами сохранения энергии и момента импульса.

Изучая тему «Ядерные реакции», важно понять, что во всех ядерных реакциях выполняются законы сохранения: энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда, массы (массового числа). Особое внимание необходимо уделить реакциям синтеза легких и делению тяжелых ядер, вопросам ядерной энергетики и проблемам управления термоядерными реакциями.

Контрольная работа № 6 представлена набором задач, включающих следующие вопросы: определение длины волны де Бройля движущихся частиц, соотношения неопределенности Гейзенберга, применение уравнения Шредингера для частицы, находящейся в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. В эту контрольную работу включены также задачи по теме «Элементы физики твердого тела», в которых определяются параметры объемно центрированных и гранецентрированных кубических решеток, удельная и молярная теплопроводность при постоянном объеме по теории Дебая при  $T \ll \Theta_D$ , примесная электропроводность некоторых полупроводников.

Раздел «Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц» представлен задачами на закон радиоактивного распада, определение дефекта массы, энергии связи и удельной энергии связи ядра, энергии ядерных реакций.

### ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$\Delta x \Delta p_x > \frac{h}{2\pi},$$

$$\Delta E \Delta t > \frac{h}{2\pi}$$

$$w = |\psi|^2$$

$$\Psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l}$$

$$E_n = \frac{\hbar^2}{8ml^2} n^2$$

$$\langle N_1 \rangle = \left[ \exp \left( \frac{E_1}{kT} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$C_V = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 = 234 R \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3$$

$$C_V = 3R$$

$$\Theta_D = \frac{h\nu_{\max}}{k}$$

$$\langle N_1 \rangle =$$

$$= 2 \left[ \exp \left( \frac{E_1 - E_F}{kT} \right) + 1 \right]^{-1}$$

$$\gamma = e(n+b_+ + n-b_-)$$

Примесная электропроводность полупроводников

Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Активность радиоактивного вещества

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

Закон поглощения гамма-излучения веществом

Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_A$$

$$E_{cb} = e^2 \Delta m$$

Энергия связи ядра

Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2 (m_1 + m_2 - \Sigma m')$$

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Кинетическая энергия протона в четыре раза меньше его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для протона.

Дано:  $E_k = 1/4 E_0$ ;  $E_0 = 1,50 \cdot 10^{-10}$  Дж.

Найти:  $\lambda$ .

**Решение.** Длина волны де Броиля

$$\lambda = h/p, \quad (1)$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $p$  — импульс частицы. Так как, по условию задачи,

$$E_k = \frac{1}{4} E_0 \quad (2)$$

(кинетическая энергия  $E_k$  протона сравнима с его энергией покоя  $E_0$ ), то справедливо релятивистское соотношение между полной энергией и импульсом

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2, \quad (3)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $E$  — полная энергия, равная  $E = E_0 + E_k$ .  $(4)$

Подставляя (4) в (3), получаем релятивистское соотношение между импульсом и кинетической энергией;

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) условие (2), находим

$$p = \frac{3}{4} \frac{E_0}{c}. \quad (6)$$

С учетом равенства (6) выражение (1) примет вид

$$\lambda = \frac{4}{3} \frac{hc}{E_0}; \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{4 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{3 \cdot 1,50 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}} = 1,77 \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

**Ответ:**  $\lambda = 1,77 \cdot 10^{-15}$  м.

2. Масса движущегося электрона в три раза больше его массы покоя. Чему равна минимальная неопределенность координаты электрона?

**Дано:**  $m = 3m_0$ ;  $m_0 = 0,91 \cdot 10^{-30}$  кг.

**Найти:**  $\Delta x_{\min}$ .

**Решение.** Согласно соотношению неопределенности Гейзенберга,

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta p_x$  — неопределенности координаты и импульса частицы;  $\hbar$  — постоянная Планка. Учитывая, что импульс равен

$$p = mv, \quad (2)$$

где  $m$  — масса, а  $v$  — скорость частицы, соотношение (1) можно представить в виде

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2\pi m \Delta v_x}. \quad (3)$$

Так как неопределенность скорости  $\Delta v_x$ , как и сама скорость, не может превышать скорости света  $c$  в вакууме, то

$$\Delta v_x = h/(2\pi m c). \quad (4)$$

Согласно условию задачи,  $m = 3m_0$ . Тогда [см. (4)]

$$\Delta x_{\min} = \frac{\hbar}{6\pi m_0 c};$$

$$\Delta x_{\min} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,91 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,28 \cdot 10^{-13} \text{ м}.$$

**Ответ:**  $\Delta x_{\min} = 1,28 \cdot 10^{-13}$  м.

3. Среднее время жизни возбужденных состояний атома составляет 10 нс. Вычислить естественную ширину спектральной линии ( $\lambda = 0,7$  мкм), соответствующей переходу между возбужденными уровнями атома.

**Дано:**  $\tau = 10^{-8}$  с;  $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$  м.

**Найти:**  $\Delta \lambda_{\min}$ .

**Решение.** Согласно соотношению неопределенности Гейзенберга,

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\Delta E$  — неопределенность энергии возбужденного уровня атома;  $\Delta t$  — неопределенность момента времени перехода атома из одного состояния в другое;  $\hbar$  — постоянная Планка. Учитывая, что энергия излучения

$$\frac{\hbar c}{\lambda} = E_n - E_k, \quad (2)$$

где  $E_n$  и  $E_k$  — энергетические уровни атома;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $c$  — скорость света в вакууме. Неопределенность длины волны  $\Delta \lambda$  излучения связана с неопределенностью энергии уровней  $\Delta E_n$  и  $\Delta E_k$  атома соотношением

$$\frac{\hbar c}{\lambda^2} \Delta \lambda = \Delta E_n + \Delta E_k. \quad (3)$$

Так как неопределенность  $\Delta t$  момента перехода не может превышать среднего времени жизни  $\tau$  возбужденного состояния атома, то минимальная неопределенность энергии возбужденных уровней, согласно (1),

$$\Delta E_{\min} = \frac{\hbar}{2\pi\tau}. \quad (4)$$

Из (3) с учетом (4) найдем минимальную неопределенность длины волны излучения (естественную ширину спектральной линии):

$$\Delta \lambda_{\min} = \frac{\lambda^2}{\pi c \tau}; \quad (5)$$

$$\Delta \lambda_{\min} = \frac{(7 \cdot 10^{-7} \text{ м})^2}{3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 5,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$

**Ответ:**  $\Delta\lambda_{\min} = 5,2 \cdot 10^{-14}$  м.

4. Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  на втором энергетическом уровне. В каких точках ямы плотность вероятности обнаружения частицы совпадает с классической плотностью вероятности?

Дано:  $l; w_n = w_\infty; n = 2$ .

Найти:  $x$ .

**Решение.** Волновая функция, описывающая состояние частицы в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$ , имеет вид

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (1)$$

где  $n$  — номер энергетического уровня ( $n=1, 2, 3 \dots$ );  $x$  — координата частицы в яме ( $0 \leq x \leq l$ ). Согласно физическому смыслу волновой функции,

$$|\psi|^2 = w, \quad (2)$$

где  $w$  — плотность вероятности обнаружения частицы в точке с координатой  $x$ . Если частица находится на втором энергетическом уровне ( $n=2$ ), то

$$w_2 = \frac{2}{l} \sin^2 \left( \frac{2\pi x}{l} \right). \quad (3)$$

В соответствии с принципом соответствия Бора выражение для классической плотности вероятности получается при  $n \rightarrow \infty$ :

$$w_\infty = \frac{1}{l}. \quad (4)$$

Приравнивая по условию задачи выражения (3) и (4), получаем

$$\sin^2 \left( \frac{2\pi x}{l} \right) = \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Решая уравнения (5), находим

$$x = \left( k \pm \frac{1}{4} \right) \frac{l}{2} \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (6)$$

В пределах потенциальной ямы ( $0 \leq x \leq l$ ) таких точек четыре:

$$x = \left( \frac{l}{8}, \frac{3l}{8}, \frac{5l}{8}, \frac{7l}{8} \right).$$

**Ответ:**  $x = \left( \frac{l}{8}, \frac{3l}{8}, \frac{5l}{8}, \frac{7l}{8} \right)$ .

5. Полоний имеет простую кубическую решетку. Постоянная решетки 0,334 нм. Вычислить плотность полония.

Дано:  $a = 3,34 \cdot 10^{-10}$  м.

Найти:  $\rho$ .

### Решение. Плотность полония

$$\rho = mn, \quad (1)$$

где  $m$  — масса атома полония;  $n$  — концентрация атомов. Полоний имеет простую кубическую решетку. Некоторые характеристики кубических решеток приведены в таблице.

Таблица

	Тип решетки		
	ПК	ОЦК	ГЦК
Объем элементарной ячейки	$a^3$	$a^3$	$a^3$
Число атомов на одну ячейку	1	2	4
Расстояние между ближайшими соседними атомами	$a$	$\sqrt{3}a/2$	$\sqrt{2}a/2$

Обозначения решеток: ПК — простая кубическая, ОЦК — объемно центрированная кубическая, ГЦК — гранецентрированная кубическая.

$$\rho = \frac{M}{N_A a^3}; \quad (4)$$

$$\rho = \frac{209 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} (3,34 \cdot 10^{-10} \text{ м})^3} = 9,31 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

**Ответ:**  $\rho = 9,31 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

6. Дебаевская температура кристалла равна 150 К. Определить максимальную частоту колебаний кристаллической решетки. Сколько фононов такой частоты возбуждается в среднем в кристалле при температуре 300 К?

Дано:  $\Theta_D = 150$  К;  $T = 300$  К.

Найти:  $v_{\max}$ ;  $\langle N_i \rangle$ .

**Решение.** Дебаевская температура

$$\Theta_D = h v_{\max} / k, \quad (1)$$

где  $v_{\max}$  — максимальная частота колебаний кристаллической решетки,  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана. Из (1) найдем

$$v_{\max} = k \Theta_D / h. \quad (2)$$

Подставляя в (2) числовые значения, получаем

$$v_{\max} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 150 \text{ К}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 3,12 \cdot 10^{12} \text{ Гц}.$$

Среднее число фононов с энергией  $e_i$

$$\langle N_i \rangle = \left[ \exp \left( \frac{e_i}{kT} \right) - 1 \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $T$  — температура кристалла. Энергия фона, соответствующая частоте колебаний  $\nu_{\max}$ ,

$$\epsilon_i = h\nu_{\max} = k\Theta_D. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), находим

$$\langle N_i \rangle = \left[ \exp \left( \frac{\Theta_D}{T} \right) - 1 \right]^{-1};$$

$$\langle N_i \rangle = \left[ \exp \left( \frac{150 \text{ К}}{300 \text{ К}} \right) - 1 \right]^{-1} = 1,54.$$

**Ответ:**  $\nu_{\max} = 3,12 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ ;  $\langle N_i \rangle = 1,54$ .

7. Сколько атомов распадается в 1 г  ${}^3\text{H}$  за среднее время жизни этого изотопа?

**Дано:**  $m = 10^{-3} \text{ кг}$ ;  $t = \tau$ .

**Найти:**  $N'$ .

**Решение.** Согласно закону радиоактивного распада,

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где  $N$  — число нераспавшихся атомов в момент времени  $t$ ;  $N_0$  — начальное число радиоактивных атомов в момент  $t=0$ ;  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада. Среднее время жизни радиоактивного изотопа есть величина, обратная постоянной распада:

$$\tau = 1/\lambda. \quad (2)$$

По условию задачи,  $t = \tau$ , тогда

$$N = N_0/e. \quad (3)$$

Число атомов, распавшихся за время  $t$ ,

$$N' = N_0 - N = N_0(1 - 1/e). \quad (4)$$

Число атомов, содержащихся в массе  $m$  изотопа  ${}^3\text{H}$ ,

$$N_0 = \frac{m}{M} N_A, \quad (5)$$

где  $M$  — молярная масса изотопа  ${}^3\text{H}$ ;  $N_A$  — постоянная Авогадро. С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$N' = \frac{m}{M} N_A \left( 1 - \frac{1}{e} \right);$$

$$N' = \frac{10^{-3} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \left( 1 - \frac{1}{2,72} \right) = 1,27 \cdot 10^{23}.$$

**Ответ:**  $N' = 1,27 \cdot 10^{23}$ .

8. На поверхность воды падает гамма-излучение с длиной волны 0,414 пм. На какой глубине интенсивность излучения уменьшится в два раза?

**Дано:**  $\lambda = 4,14 \cdot 10^{13} \text{ м}$ ;  $I_0/I = 2$ .

**Найти:**  $x$ .

**Решение.** Согласно закону поглощения гамма-излучения веществом,

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего излучения;  $I$  — интенсивность излучения на глубине  $x$ ;  $\mu$  — коэффициент линейного поглощения. Решая (1) относительно  $x$ , находим

$$x = \frac{1}{\mu} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (2)$$

Для определения коэффициента линейного ослабления вычислим энергию гамма-фотонов:

$$\epsilon = hc/\lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света в вакууме. Подставляя в (3) числовые значения, получаем

$$\epsilon = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4,14 \cdot 10^{-13} \text{ м}} = 4,8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 3 \text{ МэВ.}$$

Рис. 8

По графику (рис. 8) зависимости  $\mu(\epsilon)$  находим  $\mu = 0,04 \text{ см}^{-1}$ . Подставляя числовые значения в выражение (2), получаем

$$x = \frac{\ln 2}{0,04 \text{ см}^{-1}} = 17,3 \text{ см.}$$

**Ответ:**  $x = 17,3 \text{ см}$ .

9. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра  ${}^{16}_8\text{O}$ .

**Решение.** Дефект массы

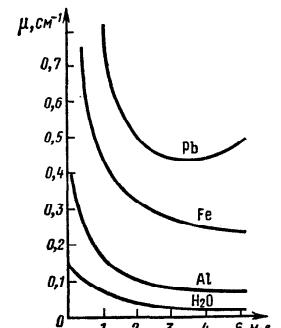
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a, \quad (1)$$

где  $Z$  — зарядовое число;  $A$  — массовое число;  $m_p$  — масса протона;  $m_n$  — масса нейтрона;  $m_a$  — масса ядра. Формулу (1) можно также записать в виде

$$\Delta m = Zm_{^1\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a, \quad (2)$$

где  $m_{^1\text{H}}$  — масса атома  ${}^1\text{H}$ ;  $m_a$  — масса атома, дефект массы ядра которого определяется. Из справочных таблиц находим  $m_{^1\text{H}} = 1,00783 \text{ а. е. м.}$ ;  $m_n = 1,00867 \text{ а. е. м.}$ ;  $m_{^{16}\text{O}} = 15,99492 \text{ а. е. м.}$ . Подставляя в (2) числовые данные (для  ${}^{16}_8\text{O}$  числа  $Z=8$ ,  $A=16$ ), получаем  $\Delta m = 0,13708 \text{ а. е. м.}$  Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m, \quad (3)$$



где  $c$  — скорость света в вакууме. Если дефект массы  $\Delta m$  выражать в а. е. м., а энергию связи  $E_{\text{св}}$  в МэВ, то формула (3) примет вид

$$E_{\text{св}} = 931 \Delta m;$$

$$E_{\text{св}} = 931 \text{ МэВ/а. е. м.} \cdot 0,13708 \text{ а. е. м.} = 127,6 \text{ МэВ.}$$

Удельная энергия связи

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}; \quad \varepsilon_{\text{св}} = \frac{127,6 \text{ МэВ}}{16} = 7,98 \text{ МэВ.}$$

Ответ:  $\Delta m = 0,13708$  а. е. м.;  $E_{\text{св}} = 127,6$  МэВ;  $\varepsilon_{\text{св}} = 7,98$  МэВ.

10. Вычислить энергию ядерной реакции  $p + {}_3^7\text{Li} \rightarrow {}_4^7\text{Be} + n$ . Выделяется или поглощается энергия при этой реакции?

Решение. Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2 [m_1 + m_2 - \sum m_i], \quad (1)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы частиц, вступающих в реакцию;  $\sum m_i$  — сумма масс частиц, образовавшихся в результате реакции. Если массы частиц выражать в а. е. м., а энергию реакции в МэВ, то формула (1) примет вид

$$Q = 931 [m_1 + m_2 - \sum m_i]. \quad (2)$$

При вычислении энергии ядерной реакции можно использовать массы атомов, а не их ядер. Из справочных данных находим  $m_{{}_1^{\text{H}}} = 1,00783$  а. е. м.;  $m_{{}_3^7\text{Li}} = 7,01601$  а. е. м.;  $m_{{}_4^7\text{Be}} = 7,01693$  а. е. м.;  $m_n = 1,00867$  а. е. м.

Дефект массы реакции

$$(m_{{}_1^{\text{H}}} + m_{{}_3^7\text{Li}} - m_{{}_4^7\text{Be}} - m_n) = -0,00176 \text{ а. е. м.}$$

Подставляя числовые значения в (2), получаем

$$Q = 931 \text{ МэВ/а. е. м.} (-0,00176) \text{ а. е. м.} = -1,64 \text{ МэВ.}$$

Так как  $Q < 0$ , то энергия в результате реакции поглощается.

Ответ:  $Q = -1,64$  МэВ.

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 6 (5)

1. При какой скорости дебройлевская длина волны микрочастицы равна ее комптоновской длине волны?

2. Какой кинетической энергией должен обладать электрон, чтобы дебройлевская длина волны была равна его комптоновской длине волны?

3. Чему должна быть равна кинетическая энергия протона, чтобы дебройлевская длина волны совпадала с его комптоновской длиной волны?

4. Кинетическая энергия электрона равна его энергии покоя. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона.

5. Кинетическая энергия протона в два раза меньше его энергии покоя. Чему равна дебройлевская длина волны протона?

6. Масса движущегося электрона в два раза больше его массы покоя. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона.

7. Чему равна дебройлевская длина волны протона, движущегося со скоростью: а)  $0,05 c$ ; б)  $0,5 c$  ( $c$  — скорость света в вакууме):

8. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов: а) 500 В; б) 500 кВ.

9. Чему равна дебройлевская длина волны теплового нейтрона, обладающего энергией, равной средней энергии теплового движения при температуре 300 К.

10. Средняя кинетическая энергия электрона в невозбужденном атоме водорода равна 13,6 эВ. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона.

11. Чему равна минимальная неопределенность координаты покоящегося электрона?

12. Вычислить минимальную неопределенность координаты покоящегося протона.

13. Кинетическая энергия электрона равна его энергии покоя. Чему равна при этом минимальная неопределенность координаты электрона?

14. Масса движущегося протона в два раза больше его массы покоя. Вычислить минимальную неопределенность координаты протона.

15. Чему равна минимальная неопределенность координаты фотона, соответствующего: а) видимому излучению с длиной волны 0,63 мкм; б) рентгеновскому излучению с длиной волны 25 пм?

16. Среднее расстояние электрона от ядра в невозбужденном атоме водорода равно 52,9 пм. Вычислить минимальную неопределенность скорости электрона в атоме.

17. Среднее время жизни возбужденного состояния атома равно 12 нс. Вычислить минимальную неопределенность длины волны  $\lambda = 0,12$  мкм излучения при переходе атома в основное состояние.

18. Естественная ширина спектральной линии  $\lambda = 0,55$  мкм, соответствующей переходу атома в основное состояние, равна 0,01 пм. Определить среднее время жизни возбужденного состояния атома.

19. Среднее время жизни пи-нуль-мезона составляет  $0,8 \times 10^{-16}$  с, а его энергия покоя равна 135 МэВ. Чему равна минимальная погрешность определения массы частицы?

20. Среднее время жизни эта-мезона составляет  $2,4 \cdot 10^{-19}$  с, а его энергия покоя равна 549 МэВ. Вычислить минимальную неопределенность массы частицы.

21. Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной 0,1 нм. Вычислить в электронвольтах энергию основного состояния электрона.

22. Протон находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной 0,01 пм. Вычислить в мегаэлектронвольтах энергию основного состояния протона.

23. Альфа-частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме. Чему равна ширина ямы, если минимальная энергия частицы составляет 6 МэВ?

24. Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной 0,1 нм. Вычислить длину волны излучения при переходе электрона со второго на первый энергетический уровень.

25. Протон находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной 0,01 пс. Вычислить длину волны излучения при переходе протона со второго на первый энергетический уровень.

26. Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной 0,1 м. Вычислить отношение разности энергий соседних уровней, соответствующих средней энергии теплового движения электрона при температуре 300 К, к этой энергии.

27. Атом водорода находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной 0,1 м. Вычислить разность энергий соседних уровней, соответствующих средней энергии теплового движения атома при температуре 300 К.

28. Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  в основном состоянии. В каких точках ямы плотность вероятности обнаружения частицы совпадает с классической плотностью вероятности?

29. Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  в основном состоянии. Чему равно отношение плотности вероятности обнаружения частицы в центре ямы к классической плотности вероятности?

30. Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  в первом возбужденном состоянии. В каких точках ямы плотность вероятности обнаружения частицы максимальна, а в каких — минимальна?

31. Платина имеет гранецентрированную кубическую решетку. Найти плотность платины и расстояние между ближайшими соседними атомами, если параметр решетки равен 0,392 нм.

32. Молибден имеет объемно центрированную кубическую решетку. Вычислить плотность молибдена и расстояние между ближайшими соседними атомами, если параметр решетки равен 0,315 нм.

33. Золото имеет гранецентрированную кубическую решетку. Плотность золота при комнатной температуре 19,28 г/см<sup>3</sup>. Найти параметр решетки и расстояние между ближайшими соседними атомами.

34. Железо имеет объемно центрированную кубическую решетку. Найти параметр решетки и расстояние между ближайши-

ми соседними атомами. Плотность железа при комнатной температуре равна 7,87 г/см<sup>3</sup>.

35. Определить максимальную энергию фона в кристалле, дебаевская температура которого равна 200 К. Какое количество фонаов с максимальной энергией возбуждается в среднем при температуре 300 К?

36. Вычислить удельную изохорную теплоемкость селена при температуре 3 К и 300 К. Температура Дебая для селена равна 90 К.

37. Молярная изохорная теплоемкость аргона при температуре 4 К оказалась равной 0,174 Дж/(моль·К). Вычислить по значению теплоемкости дебаевскую температуру аргона.

38. Какое число свободных электронов в металле занимают в среднем уровень с энергией, равной энергии Ферми?

39. Определить примесную электропроводимость германия, который содержит индий с концентрацией  $2 \cdot 10^{22}$  м<sup>-3</sup> и мышьяк с концентрацией  $5 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup>. Подвижности электронов и дырок для германия соответственно равны 0,45 и 0,35 м<sup>2</sup>/(В·с).

40. Определить примесную электропроводимость кремния, который содержит бор с концентрацией  $5 \cdot 10^{22}$  м<sup>-3</sup> и сурьму с концентрацией  $2 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup>. Подвижности электронов и дырок для кремния соответственно равны 0,13 и 0,05 м<sup>2</sup>/(В·с).

41. Какая доля первоначального количества радиоактивного изотопа распадается за время жизни этого изотопа?

42. Сколько атомов  $^{222}\text{Rn}$  распадается за сутки, в 1 г этого изотопа?

43. За какое время распадается 75% атомов  $^{45}\text{Ca}$ ?

44. Найти активность 1 г изотопа  $^{226}\text{Ra}$ .

45. Найти период полураспада радиоактивного препарата, если за сутки его активность уменьшается в четыре раза.

46. Вследствие радиоактивного распада  $^{238}\text{U}$  превращается в  $^{206}\text{Pb}$ . Сколько альфа- и бета-превращений он при этом испытывает?

47. Вычислить толщину слоя половинного поглощения свинца для гамма-лучей, длина волны которых равна 0,775 пм.

48. Чему равна энергия гамма-фотонов, если при прохождении через слой железа толщиной 3 см интенсивность излучения ослабляется в три раза?

49. Во сколько раз изменится интенсивность излучения гамма-фотонов с энергией 2 МэВ при прохождении экрана, состоящего из двух плит: свинцовой толщиной 2 см и алюминиевой толщиной 5 см?

50. Рассчитать толщину защитного свинцового слоя, который ослабляет интенсивность излучения гамма-фотонов с энергией 2 МэВ в пять раз.

51. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи альфа-частицы.

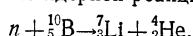
52. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра  $^{48}\text{Ca}$ .

53. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра  $^{238}\text{U}$ .

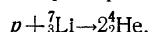
54. Определить максимальную кинетическую энергию электрона, испускаемого при распаде нейтрона. Написать уравнение распада.

55. При аннигиляции электрона и позитрона образуются два гамма-фотона. Найти энергию и длину волны каждого из фотонов, если кинетическая энергия электрона и позитрона была много меньше их энергии покоя.

56. Вычислить энергию ядерной реакции



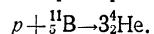
57. Вычислить энергию ядерной реакции



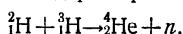
58. Вычислить энергию ядерной реакции



59. Вычислить энергию ядерной реакции



60. Вычислить энергию ядерной реакции



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение
Нормальное ускорение свободного падения	$g$	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})^2$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R$	$8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Объем одного моля идеального газа при нормальных условиях ( $T_0 = 273,15 \text{ К}; p_0 = 101325 \text{ Па}$ )	$V_0$	$22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Элементарный заряд	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,65 \text{ Кл/моль}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Стефана — Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Вина в первом законе (смещения)	$b_1$	$2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Вина во втором законе	$b_2$	$1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$
Постоянная Планка	$\hbar$	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Ридберга	$R$	$1,05 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-1}$
Боровский радиус	$a$	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_c$	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}$
Атомная единица массы	$\text{а. е. м.}$	$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Энергия, соответствующая 1 а. е. м.		$931,50 \text{ МэВ}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/А}$
Магнетон Бора	$\mu_B$	$9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерный магнетон	$\mu_N$	$5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$

### 2. Некоторые астрономические величины

Радиус Земли (среднее значение)	$6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$
Масса Земли	$5,96 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Солнца (среднее значение)	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Радиус Луны (среднее значение)	$1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22} \text{ кг}$

Среднее расстояние между центрами  
 Земли и Луны  $3,84 \cdot 10^8$  м  
 Среднее расстояние между центрами  
 Солнца и Земли  $1,5 \cdot 10^{11}$  м  
 Период обращения Луны вокруг Земли 27 сут 7 ч и 43 мин

### 3. Плотность жидкостей $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м<sup>3</sup>

Вода (при 4°C)	1	Керосин	0,8	Ртуть	13,6
Глицерин	1,26	Масло	0,9	Спирт	0,8

### 4. Плотность газов (при нормальных условиях), кг/м<sup>3</sup>

Азот	1,25	Водород	0,09	Гелий	0,18
Аргон	1,78	Воздух	1,29	Кислород	1,43

### 5. Плотность $\rho$ , модуль упругости (модуль Юнга) $E$ , коэффициент линейного расширения ( $\alpha$ среднее значение) $\alpha$ некоторых твердых тел

Твердое тело	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$E \cdot 10^{-10}$ , Па	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>
Алюминий	2,7	7,0	24
Вольфрам	19,75	41,1	4,3
Железо (сталь)	7,85	22,0	11,9
Константан	8,9	21,0	
Лед	0,92	0,28	17,0
Медь	8,8	12,98	16,7
Никель	8,8	20,4	13,4
Нихром	8,4	—	
Фарфор	2,3	—	3

### 6. Скорость звука в веществе (при 15°C), м/с

Бериллий	12500
Воздух	340
Вода	1450
Воск	390

### 7. Подвижность ионов в электролитах, м<sup>2</sup>/(В·с)

$\text{NO}_3^-$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
$\text{H}^+$	$3,26 \cdot 10^{-7}$
$\text{K}^+$	$6,7 \cdot 10^{-8}$
$\text{Cl}^-$	$6,8 \cdot 10^{-8}$
$\text{Ag}^+$	$5,6 \cdot 10^{-8}$

### 8. Эффективный диаметр молекулы газов $d \cdot 10^{10}$ , м

Азот	3,1	Воздух	3,0	Гелий	1,9
Аргон	3,6	Водород	2,3	Кислород	2,9

### 9. Удельная теплота плавления $\lambda \cdot 10^{-4}$ , Дж/кг

Лед	33,5
Свинец	2,3

### 10. Удельная теплота парообразования $r \cdot 10^{-5}$ , Дж/кг

Вода	22,5
Эфир	6,68

### 11. Удельная теплоемкость $c \cdot 10^{-2}$ , Дж/(кг·К)

Вода	41,9
Лед	21,0
Нихром	2,20
Свинец	1,26

### 12. Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^8$ , Ом·м

Вольфрам	5,5	Никелин	40,0	Медь	1,7
Железо	9,8	Нихром	110,0	Серебро	1,6

### 13. Дизэлектрическая проницаемость (относительная) вещества

Бакелит	4,0	Масло трансформаторное	Слюдя	6,0
Вода	81,0	Парафин	Стекло	7,0
			2,0	

### 14. Температурный коэффициент сопротивления проводников $\alpha \cdot 10^3$ , К<sup>-1</sup>

Вольфрам	5,2
Медь	4,2
Никелин	0,1

### 15. Потенциал ионизации, эВ

Водород	13,6
Ртуть	10,4

### 16. Показатель преломления

Алмаз	2,42	Глицерин	1,47	Соль каменная	1,54
Вода	1,33	Сероуглерод	1,63		

### 17. Работа выхода электронов из металла, эВ

Вольфрам	4,53
Никель	4,84
Цезий	1,89
Цинк	3,74

### 18. Масса $m_0$ и энергия $E_0$ покоя некоторых частиц

Частица	$m_0$		$E_0$	
	а. с. м.	$10^{27}$ , кг	МэВ	$10^{10}$ , Дж
Электрон	0,0005486	0,000911	0,511	0,00082
Протон	1,007277	1,67251	938,27	1,503
Нейтрон	1,008665	1,67482	939,56	1,505
$\alpha$ -частица	4,001507	6,64422	3727,3	5,972

**19. Периоды полураспада некоторых радиоактивных элементов**

$^3_1\text{H}$	12 лет
$^{45}_{20}\text{Ca}$	165 суток
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8 суток
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 лет

**20. Масса некоторых изотопов**

Изотоп	$m$ , а. е. м.	Изотоп	$m$ , а. е. м.
$^1_1\text{H}$	1,007825	$^{11}_5\text{B}$	11,009305
$^2_1\text{H}$	2,014102	$^{11}_7\text{N}$	14,003074
$^3_1\text{H}$	3,016049	$^{16}_8\text{O}$	15,994915
$^4_2\text{He}$	4,002604	$^{17}_8\text{O}$	16,999133
$^7_3\text{Li}$	7,016005	$^{48}_{20}\text{Ca}$	47,952363
$^7_4\text{Be}$	7,016930	$^{238}_{92}\text{U}$	238,05076
$^{10}_5\text{B}$	10,012939		

**Основные и дополнительные единицы СИ**

Величина		Единица	
наименование	обозначение	наименование	обозначение
Длина	$L$	метр	м
Масса	$M$	килограмм	кг
Время	$T$	секунда	с
Сила электрического тока	$I$	ампер	А
Термодинамическая температура	$T$	kelvin	К
Сила света	$I$	кандела	кд
Количество вещества	$n$	моль	моль
Плоский угол	$\Phi$	радиан	рад
Телесный угол	$\Omega$	стераидиан	ср

**Производные единицы СИ, имеющие собственные наименования**

наименование	обозначение	наименование	обозначение	Выражение производной единицы СИ	
				наименование	обозначение
Частота	$\nu$	герц	Гц	—	$\text{с}^{-1}$
Сила	$F$	ньютон	Н	—	$\text{м}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$
Давление	$p$	пascal	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$
Давление, работа, теплота	$E, W, U, A, Q$	джоуль	Дж	$\text{Н}\cdot\text{м}$	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	$N, P, Q, q$	вatt	Вт	$\text{Дж}/\text{с}$	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	$U, \Phi$	кулон	Кл	$\text{с}\cdot\text{А}$	
Электрическое напряжение, электрический потенциал	$C, R, r$	вольт	В	$\text{Вт}/\text{А}$	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-3}\cdot\text{А}^{-1}$
Электрическая емкость	$C$	фарад	Ф	$\text{Кл}/\text{В}$	$\text{м}^{-2}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^4\cdot\text{А}^2$
Электрическое сопротивление	$R, r$	ом	Ом	$\text{В/А}$	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-3}\cdot\text{А}^{-3}$
Электрическая проводимость	$\sigma$	сименс	См	$\text{А}/\text{В}$	$\text{м}^{-2}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^3\cdot\text{А}^2$
Поток магнитной индукции	$\Phi$	вебер	Вб	$\text{В}\cdot\text{с}$	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	$B$	tesla	Тл	$\text{Вб}/\text{м}^2$	$\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{А}^{-1}$
Индуктивность	$L$	генири	Гн	$\text{Вб}/\text{А}$	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{А}^{-1}$
Световой поток	$\Phi$	люмен	Лм	—	$\text{кл}\cdot\text{ср}$
Освещенность	$E$	люкс	Лк	—	$\text{м}^{-2}\cdot\text{кл}\cdot\text{ср}$
Активность нуклида в радиоактивном источнике		беккерель	Бк	—	$\text{с}^{-1}$
Поглощенная доза излучения		Грей	Гр	—	$\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$
Эквивалентная доза излучения		зиверт	Зв	—	$\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$

В выражение входит наравне с основными единицами СИ дополнительная —  $\text{с}\cdot\text{радиан}$ .

**Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований**

Приставка		Множитель	Приставка		Множитель
наименование	обозначение		наименование	обозначение	
экса	Э	$10^{18}$	санти	с	$10^{-3}$
пета	П	$10^{15}$	мили	м	$10^{-3}$
тера	Т	$10^{12}$	микро	мк	$10^{-6}$
гига	Г	$10^9$	nano	н	$10^{-9}$
мега	М	$10^6$	пико	п	$10^{-12}$
кило	к	$10^3$	фемта	ф	$10^{-15}$
дэци	д	$10^{-1}$	атто	а	$10^{-18}$

**Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ\***

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ*
Масса	тонна атомная единица массы	т а. е. м.	$10^3$ кг $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Время	минута час сутки	мин ч сут	60 с 3600 с 86 400 с
Плоский угол	градус минута секунда	...° ...'/ ..."	$1,74 \cdot 10^{-2}$ рад $2,91 \cdot 10^{-4}$ рад $4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
Объем, вместимость	литр	л	$10^{-3}$ м <sup>3</sup>
Длина	астрономическая единица световой год парсек	а. е. св. год пк	$1,50 \cdot 10^{11}$ м $9,46 \cdot 10^{15}$ м $3,08 \cdot 10^{16}$ м
Оптическая сила	диоптрия	дптр	$1 \text{ м}^{-1}$
Площадь	гаектар	га	$10^4 \cdot \text{м}^2$
Энергия	электрон-вольт	эВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж
Полная мощность	вольт-ампер	В·А	
Реактивная мощность	вар	вар	

*Примечание.* Допускается также применять другие единицы, получившие широкое распространение. Например, неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. д. Единицы времени (минуту, час, сутки), плоского угла (градус, минуту, секунду) астрономическую единицу светового года, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Общие методические указания . . . . .	3
Рабочая программа . . . . .	6
Фундаментальные физические постоянные . . . . .	12
Задачи для самостоятельного решения . . . . .	13
Учебные материалы по разделам курса физики . . . . .	17
I. Физические основы механики . . . . .	17
Пояснения к рабочей программе . . . . .	17
Основные законы и формулы . . . . .	18
Примеры решения задач . . . . .	20
Контрольная работа № 1 . . . . .	28
II. Основы молекулярной физики и термодинамики . . . . .	32
Пояснения к рабочей программе . . . . .	32
Основные законы и формулы . . . . .	33
Примеры решения задач . . . . .	35
Контрольная работа № 2 . . . . .	42
III. Электростатика. Постоянный ток . . . . .	46
Пояснения к рабочей программе . . . . .	46
Основные законы и формулы . . . . .	47
Примеры решения задач . . . . .	49
Контрольная работа № 3 (2) . . . . .	56
IV. Электромагнетизм. Колебания и волны . . . . .	61
Пояснения к рабочей программе . . . . .	61
Основные законы и формулы . . . . .	62
Примеры решения задач . . . . .	63
Контрольная работа № 4 (3) . . . . .	71
V. Волновая оптика. Квантовая природа излучения . . . . .	76
Пояснения к рабочей программе . . . . .	76
Основные законы и формулы . . . . .	77
Примеры решения задач . . . . .	78
Контрольная работа № 5 (4) . . . . .	87
VI. Элементы атомной и ядерной физики и физики твердого тела . . . . .	92
Пояснения к рабочей программе . . . . .	92
Основные законы и формулы . . . . .	93
Примеры решения задач . . . . .	93
Контрольная работа № 6 (5) . . . . .	100
Приложение . . . . .	105

*Учебное издание*

Владимир Леонидович Прокофьев  
Валентина Феофановна Дмитриева  
Вячеслав Александрович Рябов  
Владимир Матвеевич Гладской  
Петр Иванович Самойленко

**ФИЗИКА**

Методические указания и контрольные задания  
для студентов-заочников  
инженерно-экономических специальностей вузов

Зав. редакцией Е. С. Гридасова  
Редактор Г. Н. Чернышева  
Мл. редактор Г. В. Вягода  
Художественный редактор В. И. Пономаренко  
Технический редактор В. М. Романова  
Корректор Г. Н. Буханова

Н/К

Изд. № ФМ—940. Сдано в набор 18.03.88. Подп. в печать 27.07.88.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Объем 7,00 усл. л. 7,12 усл. кр.-отт. 6,93 уч.-изд. л.  
Тираж 30 000 экз. Зак. № 209. Цена 20 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.