

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В. В. СЕРГЕЕВА, Т. А. ИЛЮХИНА,
Н. Н. СЕННИКОВА, З. Ф. КРИВУЦА**

ФИЗИКА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Благовещенск
Дальневосточный ГАУ
2023

УДК 53
ББК 22.3
Ф50

Рецензент

*Елена Сергеевна Дубкова, кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры электроэнергетики и электротехники
Дальневосточного государственного аграрного университета*

*Рекомендовано к печати методическим советом
электроэнергетического факультета
Дальневосточного государственного аграрного университета*

Ф50 **Физика** : учебно-методическое пособие / В. В. Сергеева,
Т. А., Илюхина, Н. Н. Сенникова, З. Ф. Кривуца ; Дальне-
вост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальневосточный ГАУ,
2023. – 142 с.

ISBN 978-5-9642-0589-0

Учебно-методическое пособие написано в соответствии с рабочей программой дисциплины «Физика» и включает в себя методические указания по выполнению работ, теоретический материал, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения, варианты контрольных заданий. В начале каждого раздела приведены основные законы и формулы, необходимые для решения задач.

Учебно-методическое пособие предназначено для проведения практических занятий по физике для обучающихся очной и заочной форм обучения по программам бакалавриата.

УДК 53
ББК 22.3

ISBN 978-5-9642-0589-0

© Сергеева В. В., Илюхина Т. А., Сенникова Н. Н.,
Кривуца З. Ф., 2023
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Содержание разделов дисциплины	9
Сведения о приближенных вычислениях	15
Примерная схема решения задач	17
1 Механика	18
1.1 Основные законы и формулы	18
1.2 Примеры решения задач	22
2 Основы молекулярной физики и термодинамики	38
2.1 Основные законы и формулы	38
2.2 Примеры решения задач	40
3 Электростатика. Постоянный ток	54
3.1 Основные законы и формулы	54
3.2 Примеры решения задач	57
4 Электромагнетизм. Колебания и волны	67
4.1 Основные законы и формулы	67
4.2 Примеры решения задач	69
5 Волновая оптика. Квантовая природа излучения	84
5.1 Основные законы и формулы	84
5.2 Примеры решения задач	87
Задачи для самостоятельного решения	104
Вопросы для подготовки к контрольным и тестовым заданиям	112
Контрольные задания	119
Тестовые задания	136
Список рекомендуемой литературы	141

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Физика» является получение фундаментального образования, способствующего дальнейшему развитию личности. При этом необходимо создание у студентов основ достаточно широкой теоретической подготовки в области физики, позволяющей ориентироваться в потоке научной и технической информации, и обеспечивающей им возможность использования новых физических принципов в тех областях техники, в которых они специализируются.

Задачами освоения дисциплины выступают:

- 1) изучение основных физических явлений;
- 2) овладение фундаментальными понятиями, законами и теориями физики, а также методами физического исследования;
- 3) формирование научного мышления и современного естественно-научного 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;
- 4) усвоение основных физических явлений и законов классической и современной физики, методов физического исследования;
- 5) выработка приемов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих в дальнейшем решать задачи естественно-научного профиля;
- 6) ознакомление с современной научной аппаратурой и выработка начальных навыков проведения экспериментальных научных исследований различных физических явлений и оценки погрешностей измерений.

Одной из форм обучения студента является самостоятельная работа над учебным материалом. Для облегчения этой работы кафедрой физики, математики и информатики Дальневосточного государственного аграрного университета организовано чтение лекций, проведение практических и лабораторных занятий. *Процесс изучения физики состоит из следующих этапов: 1) проработка лекционного материала; 2) решение задач на практических занятиях; 3) выполнение лабораторного практикума; 4) самостоятельная работа над учебниками и учебными пособиями; 5) решение тестовых заданий; 6) сдача зачетов и экзаменов.*

Данное пособие позволит облегчить самостоятельную и аудиторную работу русскоговорящих и иностранных обучающихся при подготовке к любому виду занятий по физике, так как содержит теоретический материал и алгоритм решения задач. Кроме того, данное пособие снабжено различными вариантами работ, помогающими овладеть разнообразными приемами решений. Теоретический материал и примеры решения задач представлен детально и упрощен в изложении.

Согласно требованиям к результатам освоения учебной программы, процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих **компетенций и их индикаторов:**

1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач (УК-1):

1) находит и критически анализирует информацию, необходимую для решения поставленной задачи ИД-1_{УК-1};

2) грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки; отличает факты от мнений, интерпретаций, оценок и т. д. в рассуждениях других участников деятельности ИД-3_{УК-1};

3) определяет и оценивает последствия возможных решений задачи ИД-4_{УК-1}.

2. Способен использовать в профессиональной деятельности основные законы физики; применять методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований; приобретать новые математические и естественно-научные знания, используя современные образовательные и информационные технологии (ОПК-6):

применяет основные законы физики, необходимые для использования в профессиональной деятельности; выделяет конкретное физическое содержание в прикладных задачах профессиональной деятельности ИД-2_{ОПК-6}.

При самостоятельной работе над учебным материалом необходимо:

1. Составлять конспект, в котором необходимо записывать законы и формулы, выражающие эти законы; определения основных физических понятий и сущность физических явлений и методов исследования.

2. Изучать курс физики систематически, так как в противном случае материал будет усвоен поверхностно.

3. Пользоваться учебником или учебным пособием, чтобы не утрачивалась логическая связь между отдельными вопросами, по крайней мере, внутри какого-то определенного раздела курса.

Контрольные работы и решение тестовых заданий во время проведения практических занятий позволяют закрепить теоретический материал курса. Решение задач в контрольных работах и тестовые задания являются проверкой степени усвоения обучающимся теоретического материала, а также освоения компетенций и их индикаторов. Перед самостоятельным выполнением работы необходимо внимательно ознакомиться с примерами решения задач по данной теме, уравнениями и формулами, со справочными материалами. Прежде чем приступить к решению той или иной задачи, обучающийся должен хорошо понять ее содержание, составить примерный план, направленный на решение задачи и ответов на поставленные в ней вопросы.

Согласно учебным планам, разделы дисциплины распределены следующим образом:

- 1. Механика.*
- 2. Молекулярная физика и термодинамика.*
- 3. Электродинамика.*
- 4. Оптика.*
- 5. Элементы квантовой механики и основы ядерной физики.*

Итоговая работа включает четырнадцать задач по представленным разделам.

При выполнении работ необходимо соблюдать следующие правила:

1) работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний преподавателя;

2) задачу своего варианта переписывать полностью, а заданные физические величины выписать отдельно; при этом все числовые величины должны быть переведены в одну систему единиц;

3) для пояснения решения задачи, где это нужно, аккуратно сделать чертеж;

4) решения задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями;

5) в пояснениях к задаче необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи;

6) при получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод;

7) решение задачи рекомендуется сначала сделать в общем виде, то есть только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения;

8) вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу; все числовые значения величин, необходимые

для решения данной задачи, должны быть выражены в международной системе единиц (СИ);

9) проверить единицы полученных величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить ее правильность;

11) точность расчета определяется числом значащих цифр исходных данных; константы физических величин и другие справочные данные выбираются из таблиц.

Работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, выполненные не по своему варианту, не зачитываются.

При повторной проверке обязательно представляется работа с первой проверкой.

На экзаменах и зачетах, в первую очередь, выясняется усвоение основных теоретических положений программы и умение творчески применять полученные знания к решению практических задач. Физическая сущность явлений, законов, процессов должна излагаться четко и достаточно подробно; решать задачи необходимо без ошибок и уверенно. Любая графическая работа должна быть выполнена аккуратно и четко. Только при выполнении этих условий знания по курсу физики могут быть признаны удовлетворительными.

СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

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 Лоренца. 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 и закон ее 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. Напряженность, потенциал поля. Принцип суперпозиции. Закон сохранения механической энергии и его связь с однородностью времени. Удар абсолютно упругих и неупругих тел.

Элементы кинематики вращательного движения. Угловая скорость и угловое ускорение, их связь с линейными величинами. Момент силы. Момент

количества движения тела относительно неподвижной оси вращения. Момент инерции тела относительно оси. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. Кинетическая энергия вращающегося тела.

Работа при вращательном движении. Закон сохранения количества движения.

Основы молекулярной физики и термодинамики

Статистический метод исследования и его связь с учением диалектического материализма о соотношении случайности и необходимости. Вывод 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 энергиям 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 изображения на термодинамических диаграммах. Работа газа при изменении его объема. Количество теплоты. Теплоемкость. Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам и адиабатному процессу идеального газа.

Классическая молекулярно-кинетическая теория теплостей идеальных газов и ее ограниченность. Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы (цикл). Цикл Карно 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. Уравнение 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 поляризации. 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. Емкость 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. Вывод 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 диа- и парамагнетизма. Магнитная восприимчивость вещества. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри.

Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Ток смещения. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в интегральной и дифференциальной формах. Относительный характер электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля.

Колебания и волны

Гармонические колебания (механические и электромагнитные) и их характеристики. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Математический, физический маятники. Электрический колебательный контур.

Энергия гармонических колебаний. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний (механических и электромагнитных) и его решение. Аperiodический 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 скорость и дисперсия волн. 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 диполя.

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. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии. Дифракция Фраунгофера на одной щели и на решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа-Брэгга. Исследование структуры кристаллов. Понятие о голографии. Поляризация света. Естественный и поляризованный 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. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа. Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Квантовая гипотеза и формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Законы 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. Диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

СВЕДЕНИЯ О ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

При решении физических задач числовые значения, с которыми приходится иметь дело, большей частью являются приближенными. Задачи с приближенными данными нужно решать с соблюдением правил подсчета значащих цифр. *Значащими называют все цифры, кроме нуля, а также и ноль в двух случаях: 1) когда он стоит между значащими цифрами; 2) когда он стоит в конце числа и известно, что единицы соответствующего разряда в данном числе нет.*

Приближенные вычисления следует вести с соблюдением следующих правил:

1. Так как с помощью вычислений получить результат более точный, чем исходные данные, невозможно, то достаточно производить вычисления с числами, содержащими не более знаков, чем в исходных данных.

2. При сложении или вычитании приближенных чисел, имеющих различную точность, более точное должно быть округлено до точности менее точного. Например:

$$9,6 + 0,176 = 9,6 + 0,2 = 9,8; \quad 100,8 - 0,427 = 100,8 - 0,4 = 100,4.$$

3. При умножении и делении следует в полученном результате сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет приближенное данное с наименьшим количеством значащих цифр. Например:

$$0,637 \cdot 0,023 = 0,0132, \text{ но не } 0,0132496;$$

$$6,32 : 3 = 2, \text{ но не } 2,107.$$

4. При возведении в квадрат или куб нужно сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет возводимое в степень число. Например:

$$1,25^2 = 1,56, \text{ но не } 1,5625; \quad 1,01^3 = 1,03, \text{ но не } 1,030301.$$

5. При извлечении квадратного и кубического корней в результате нужно сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное число.

Например:

$$\sqrt{10} = 3,1, \text{ но не } 3,162; \sqrt[3]{10} = 2,1, \text{ но не } 2,154.$$

При вычислении сложных выражений соблюдаются правила в зависимости от вида производимых действий.

Когда число мало отличается от единицы, можно пользоваться ниже приведенными приближенными формулами.

Если a, b, c малы по сравнению с единицей (меньше 0,05), то:

1. $(1 \pm a)(1 \pm b)(1 \pm c) = 1 \pm a \pm b \pm c;$

2. $\sqrt{1 \pm a} = 1 \pm a/2;$

3. $(1 \pm a)^n = 1 \pm na;$

4. $1/(1 \pm a)^n = 1 \pm na;$

5. $1/(1 \pm a) = 1 \pm a;$

6. $e^a = 1 + a;$

7. $\ln(1 \pm a) = \pm a - a^2/2;$

8. Если угол $\alpha \ll 5^\circ$ и выражен в радианах, то в первом приближении можно принять $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \alpha; \cos \alpha = 1$.

Соблюдая эти правила, студент сэкономит время на вычислении искомых величин при решении физических задач.

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 учебно-методическому пособию с конкретными физическими понятиями, формулами и законами 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; выявите явные и неявные данные величины; 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, отображающих физический процесс;

4) используя 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.

1 МЕХАНИКА

1.1 Основные законы и формулы

Скорость мгновенная	$v = \frac{dx}{dt}$ или $v = \frac{ds}{dt}$
Ускорение мгновенное	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$
Ускорение тангенциальное	$a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$
Ускорение нормальное	$a_n = v^2/r$
Ускорение полное	$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$
Скорость угловая	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
То же, для равномерного вращательного движения	$\omega = const; \omega = \frac{\varphi}{t}; \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$
Ускорение угловое	$\varepsilon = d\omega/dt = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$
Уравнения равнопеременного вращательного движения	$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$ $\varphi = \omega_0 t + \varepsilon t^2/2$
Связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими движение точки по окружности	$s = \varphi r; v = \omega r;$ $a_\tau = \varepsilon r; a_n = \omega^2 r$
Второй закон Ньютона для поступательного движения	$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt}$
Сила, действующая на тело массы m ($m = const$)	$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$
Количество движения материальной точки массы m , движущейся со скоростью $\vec{v}$	$\vec{p} = m\vec{v}$

Сила, действующая на тело,
движущееся по окружности радиуса r

$$F_n = ma_n = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r$$

Закон сохранения количества
движения для изолированной системы

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

Сила трения (скольжения)

$$F_{\text{тр}} = f F_n$$

(здесь F_n – сила
нормального давления)

Скорости шаров массами m_1 и m_2
после абсолютно упругого удара

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

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

Скорости шаров массами m_1 и m_2
после абсолютно неупругого удара

$$u_1 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Работа переменной силы на пути s

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

Мощность

$$N = \frac{dA}{dt}$$

$$N = \frac{d(F_n S)}{dt} = F \cos \frac{ds}{dt} =$$

$$= Fv \cos \alpha$$

Сила упругости

$$F = -kx$$

Сила гравитационного взаимодействия

$$F = Gm_1 m_2 / r^2$$

Потенциальная энергия
упругодеформированного тела
(работа упругой силы)

$$\Pi = A = k^2 / 2$$

Потенциальная энергия
гравитационного взаимодействия тела

$$\Pi = - Gm_1 m_2 / r$$

Потенциальная энергия тела,
находящегося в однородном
поле тяжести

$$\Pi = mgh$$

g – ускорение свободного
падения

Кинетическая энергия тела

$$T = mv^2/2$$
$$T = p^2/(2m)$$

Закон сохранения
механической энергии

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

Напряженность гравитационного
поля Земли

$$E = GM/(R_3 + h)^2$$

Потенциал гравитационного поля Земли

$$\varphi = GM/(R_3 + h)$$

Момент инерции материальной точки

$$J = mr^2$$

Момент инерции некоторых тел
массой m полого и сплошного
цилиндров (или диска) радиуса R
относительно оси вращения,
совпадающей с осью цилиндра

$$J_{\text{п.ц.}} = mR^2$$
$$J_{\text{спл.ц}} = mR^2/2$$

Момент инерции некоторых тел
массой m шара радиуса R относительно
оси вращения, проходящей через
центр масс шара

$$J_0 = 0,4mR^2$$

Момент инерции некоторых тел
массой m тонкого стержня длиной ℓ ,
если ось вращения перпендикулярна
стержню и проходит через центр
масс стержня

$$J_0 = m\ell^2/12$$

То же, но ось вращения проходит
через один из концов стержня

$$J_0 = m\ell^2/3$$

Моменты инерции некоторых тел
массой m тела относительно
произвольной оси (теорема Штейнера)

$$J = J_0 + md^2$$

Момент силы

относительно оси вращения

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Основное уравнение динамики

вращательного движения

$$M = \frac{dL}{dt} = \frac{d(J\omega)}{dt}$$

То же, при $J = \text{const}$

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon$$

Закон сохранения момента количества
движения для изолированной системы

$$\sum_{i=1}^n J_i \omega_i = \text{const}$$

Кинетическая энергия

вращающегося тела

$$T = J\omega^2/2$$

Работа при вращательном движении

$$dA = M d\varphi$$

Энергия покоя частицы

$$E_0 = m_0 c^2$$

Теорема сложения скоростей

в теории относительности

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

Зависимость массы частицы

от скорости v , сравнимой
со скоростью света

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Полная энергия частицы,

движущейся со скоростью v ,
сравнимой со скоростью света

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Кинетическая энергия

релятивистской частицы

$$T = E - E_0 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

Зависимость длины тела и времени от
скорости в релятивистской механике

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$
$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

1.2 Примеры решения задач

1. Движение тела массой 1 кг задано уравнением $s = 6t^3 + 3t + 2$. Найти зависимость скорости и ускорения от времени. Вычислить силу, действующую на тело в конце второй секунды.

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

$$v = \frac{ds}{dt}; v = 18t^2 + 3$$

Мгновенное ускорение определяется первой производной от скорости по времени или второй производной от пути по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}; a = 36t$$

Сила, действующая на тело, определяется по второму закону Ньютона:

$$F = ma$$

где a согласно условию задачи – ускорение в конце второй секунды. Тогда:

$$F = m \cdot 36t; F = 1 \text{ кг} \cdot 36 \cdot 2 \text{ м/с}^2 = 72 \text{ Н}.$$

Ответ: $v = 18t^2 + 3$; $a = 36t$; $F = 72 \text{ Н}$.

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

Дано: $l_0 = 1 \text{ м}$, $v = 0,8 \text{ с}$.

Найти: ℓ .

Решение. Зависимость длины тела от скорости в релятивистской механике выражается формулой $\ell = \ell_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где ℓ_0 – длина покоящегося стержня; v – скорость его движения; c – скорость света в вакууме. Подставляя в формулу числовые значения, имеем:

$$\ell = 1\text{ м} \sqrt{\frac{1 - (0,8c)^2}{c^2}} = 1\text{ м} \sqrt{1 - 0,64} = 0,6\text{ м}$$

Ответ: $l = 0,6\text{ м}$.

3. 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 и 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:

$$u'_1 = \frac{0,5c + 0,75c}{1 + \frac{0,5c \cdot 0,75c}{c^2}}$$
$$u'_2 = \frac{c + 0,75c}{1 + \frac{0,75c^2}{c^2}} = \frac{1,75c}{1,75c} = c$$

Это значит: во-первых, ни в какой инерциальной системе отсчета скорость процесса не может превзойти скорость света; во-вторых, скорость распространения света в вакууме абсолютна.

Ответ: $u'_1 = 0,91\text{ с}$; $u'_2 = c$.

4. На двух шнурах одинаковой длины, равной $0,8\text{ м}$, подвешены два свинцовых шара массами $0,5$ и 1 кг (рис. 1.1). Шары соприкасаются между собой. Шар

меньшей массы отвели в сторону так, что шнур отклонился на угол $\alpha = 60^\circ$, и отпустили. На какую высоту поднимутся оба шара после столкновения? Удар считать центральным и неупругим. Определить энергию, израсходованную на деформацию шаров при ударе.

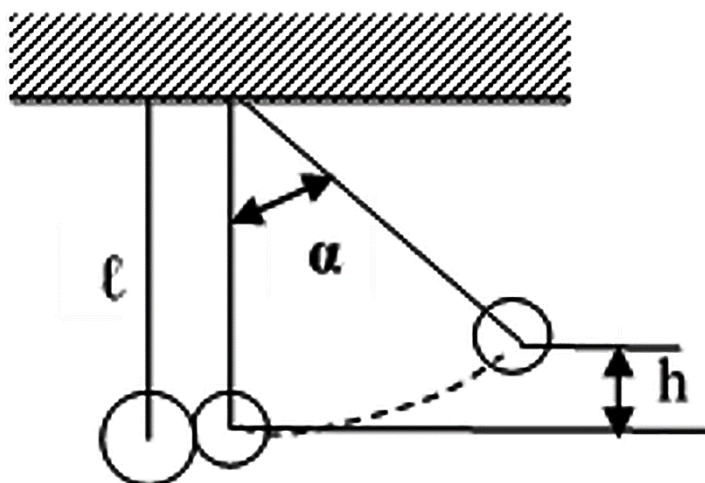


Рисунок 1.1

Дано: $m_1 = 0,5$ кг, $m_2 = 1$ кг, $\alpha = 60^\circ$; $l = 0,8$ м.

Найти: h , ΔE_d .

Решение. Так как удар шаров неупругий, то после удара шары будут двигаться с общей скоростью v . Закон сохранения количества движения при этом ударе имеет вид:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v \quad (1)$$

где v_1 и v_2 – скорости шаров до удара.

Скорость большого шара до удара равна нулю ($v_2 = 0$). Скорость меньшего шара найдем, используя закон сохранения энергии. При отклонении меньшего шара на угол α (рис. 1.1), ему сообщается потенциальная энергия, которая затем переходит в кинетическую: $m_1 g h = \frac{m_1 v_1^2}{2}$. Из рисунка видно, что:

$$h_1 = l(1 - \cos \alpha) = 2l \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad v_1 \sqrt{2gh_1} = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) находим скорость шаров после удара:

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{2m_1 \sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2}}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

Кинетическая энергия, которой обладают шары после удара, переходит в потенциальную:

$$\frac{(m_1 + m_2)v^2}{2} = (m_1 + m_2)gh \quad (4)$$

где h – высота поднятия шаров после столкновения.

Из формулы (4) находим $h = \frac{v^2}{2g}$, или с учетом (3):

$$h = \frac{2m_1^2 l \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{(m_1 + m_2)^2}$$
$$h = \frac{2 \cdot 0,5^2 \cdot 0,8 \cdot 0,25}{(0,5 + 1)^2} = 0,044 \text{ м}$$

При неупругом ударе шаров часть энергии расходуется на их деформацию. Энергия деформации определяется разностью кинетических энергий до и после удара:

$$\Delta E_{\text{д}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2}$$

Используя уравнения (2) и (3), получаем:

$$\Delta E_{\text{д}} = 2glm_1 \left(1 - \frac{m_1}{m_1 + m_2}\right) \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$
$$\Delta E_{\text{д}} = 2 \cdot 9,81 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \left(1 - \frac{0,5}{1,5}\right) \cdot 0,25 = 1,3 \text{ Дж}$$

Ответ: $h = 0,044 \text{ м}$, $\Delta E_{\text{д}} = 1,3 \text{ Дж}$.

5. Молот массой 70 кг падает с высоты 5 м и ударяет по железному изделию, лежащему на наковальне. Масса наковальни вместе с изделием 1 330 кг.

Считая удар абсолютно неупругим, определить энергию, расходуемую на деформацию изделия. Систему «молот – изделие – наковальня» считать замкнутой.

Дано: $m_1 = 70$ кг, $h = 5$ м, $m_2 = 1330$ 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, то есть незначительным перемещением тел по вертикали во время удара пренебрегаем. Тогда для энергии деформации изделия имеем:

$$\Delta E_d = \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} \quad (1)$$

где v – скорость молота в конце падения с высоты h ;

Скорость молота в конце падения с высоты h определяется без учета сопротивления воздуха и трения по формуле (2):

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

Общую скорость всех тел системы после неупругого удара найдем, применив закон сохранения количества движения (3):

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

Для рассматриваемой системы закон сохранения движения имеет вид выражения (4):

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

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

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

$$E_d = 70 \cdot 9,8 \cdot 5 \cdot \frac{1330}{1330+70} = 325,85 \text{ Дж}$$

Ответ: $E_d = 325,85 \text{ Дж}$.

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

Дано: $m = 1 \text{ кг}$, $s = 2t^2 + 4t + l$.

Найти: A , $T = f(t)$.

Решение. Работа, совершаемая силой, выражается через криволинейный интеграл:

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

Сила, действующая на тело, по второму закону Ньютона равна:

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

Мгновенное значение ускорения определяется первой производной от скорости по времени или второй производной от пути по времени. В соответствии с этим находим:

$$v = \frac{ds}{dt} = 4t + 4, \quad (3)$$

$$a = \frac{d^2 s}{dt^2} = 4 \text{ м/с}^2 \quad (4)$$

Тогда:

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

Из выражения (3) определим ds :

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

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

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

По этому выражению определим работу, совершаемую силой за 10 с начала ее действия:

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

Кинетическая энергия определяется по формуле:

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

Подставляя выражение (3) в выражение (7), имеем:

$$T = \frac{m(4t + 4)^2}{2} = \frac{m(16t^2 + 32t + 16)}{2} = m(8t^2 + 16t + 8)$$

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

7. Протон движется со скоростью $0,7c$ (c – скорость света). Найти количество движения и кинетическую энергию протона.

Дано: $v = 0,7c$.

Найти: p , T .

Решение. Количество движения протона определяется по формуле (1):

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

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

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

где m – масса движущегося протона;

$m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг – масса покоя протона;

v – скорость движения протона;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме;

$\frac{v}{c} = \beta$ – скорость протона, выраженная в долях скорости света.

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

$$p = \frac{m_0 c \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$
$$p = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 0,7}{\sqrt{1 - 0,7^2}} = 4,91 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

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

$$T = E - E_0 \quad (7)$$

где $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$; $E_0 = m_0 \cdot c^2$.

Вычислим энергию покоя протона:

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

Тогда формула (3) примет вид:

$$T = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$
$$T = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,7^2}} - 1 \right) = 0,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

Ответ: $p = 4,91 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$, $T = 0,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$.

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

Дано: $R_3 = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $R \rightarrow \infty$.

Найти: v_0 .

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

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = m \left(\frac{GM}{R_3} - \frac{GM}{R} \right) \quad (1)$$

где m – масса ракеты;

M – масса Земли;

G – гравитационная постоянная;

v_0 и v – скорости ракеты относительно Земли в начальный и рассматриваемый моменты;

R_3 и R – расстояния от центра Земли до ракеты в начальный и рассматриваемый моменты;

$\frac{GM}{R}$ – потенциал гравитационного поля Земли на расстоянии R от ее центра.

После преобразования уравнения (1) имеем:

$$v_0^2 - v^2 = 2GM \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R} \right)$$

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

$$v_0^2 = \frac{2GM}{R_3} \quad (2)$$

Из закона всемирного тяготения следует, что на поверхности Земли:

$$\frac{GmM}{R_3^2} = mg, \text{ откуда } GM = gR_3^2 \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения поверхности Земли.

Подставляя формулу (2) и (3), находим:

$$v_0^2 = 2gR_3 \text{ или } v_0 = \sqrt{2gR_3}$$

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

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

Такая скорость необходима для преодоления гравитационного поля Земли, и она называется второй космической или параболической скоростью.

Ответ: $v_0 = 11,2 \text{ км/с}$.

9. Тело брошено вверх с высоты 12 м под углом 30° к горизонту с начальной скоростью 12 м/с. Определить продолжительность полета тела до точек А и В (рис. 1.2); максимальную высоту, на которую поднимается тело; дальность полета тела. Сопротивление воздуха не учитывать.

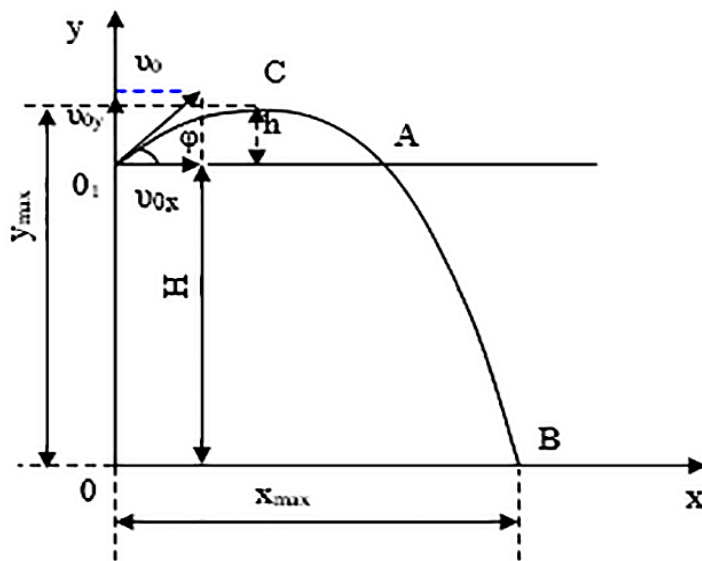


Рисунок 1.2

Дано: $H = 12 \text{ м}$, $\varphi = 30^\circ$, $v_0 = 12 \text{ м/с}$.

Найти: $t_A, t_B, y_{\max}, x_{\max}$.

Решение. В обозначенной на рисунке системе координат проекции начальной скорости будут равны:

$$v_{0x} = v_0 \cdot \cos \varphi, \tag{1}$$

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

Координаты тела с течением времени изменяются в соответствии с уравнением для равнопеременного движения (3), (4):

$$y = H + v_0 t \cdot \sin \varphi - \frac{gt^2}{2}, \quad (3)$$

$$x = v_0 t \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

Время подъема тела найдем из условия, что в наивысшей точке подъема тела его скорость равна:

$$v_y = v_0 \cdot \sin \varphi - gt = 0$$

Тогда получим:

$$t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \varphi}{g} \quad (5)$$

Время спуска тела от точки C до точки A равно времени подъема, поэтому продолжительность полета тела от точки O_I до точки A равна:

$$t_A = 2t_{\text{под}} = \frac{2v_0 \sin \varphi}{g} \quad (6)$$

Максимальную высоту подъема найдем из уравнения (3), подставив в него время подъема из уравнения (5):

$$y_{\text{max}} = \frac{H + v_0^2 \sin^2 \varphi}{2g} \quad (7)$$

Тогда:

$$t_A = \frac{2 \cdot 12 \text{ м/с} \cdot 0,5}{9,81 \text{ м/с}^2} = 1,22 \text{ с}$$

$$t_B = \frac{12 \text{ м/с} \cdot 0,5}{9,81 \text{ м/с}^2} + \sqrt{\left(\frac{12 \text{ м/с} \cdot 0,5}{9,81 \text{ м/с}^2}\right)^2 + \frac{2 \cdot 12 \text{ м}}{9,81 \text{ м/с}^2}} = 2,29 \text{ с}$$

$$y_{max} = 12 \text{ м} + \frac{12^2 (\text{м/с})^2 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} = 13,84 \text{ м}$$

$$x_{max} = 12 \text{ м/с} \cdot 2,29 \text{ с} \cdot 0,867 = 23,8 \text{ м}$$

Ответ: $t_A = 1,22 \text{ с}$, $t_B = 2,29 \text{ с}$, $y_{max} = 13,84 \text{ м}$, $x_{max} = 23,8 \text{ м}$.

10. По условию задачи 9 найти в момент приземления тела следующие величины: скорость и угол падения тела; тангенциальное и нормальное ускорения тела; радиус кривизны траектории.

Дано: $H = 12 \text{ м}$, $\varphi = 30^\circ$, $v_0 = 12 \text{ м/с}$.

Найти: v_B , β , a_τ , a_n , R .

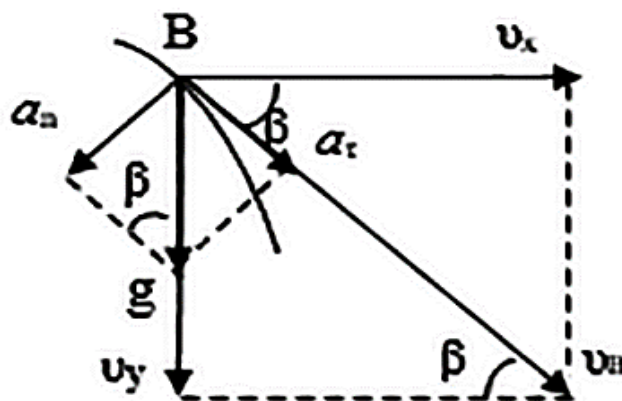


Рисунок 1.3

Решение. Результирующая, или мгновенная, скорость в точке B (рис. 1.3) составит:

$$v_B = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \varphi + v_y^2}$$

Проекцию скорости v_y в точке B найдем из уравнения (2) задачи 9, подставив в него время движения t_B :

$$v_{yB} = v_0 \sin \varphi - g t_B = \sqrt{v_0^2 \sin^2 \varphi + 2gH}$$

$$v_B = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \varphi + v_0^2 \sin^2 \varphi + 2gH} = \sqrt{v_0^2 + 2gH}$$

$$v_B = \sqrt{(12^2 + 2 \cdot 9,81 \cdot 12) \text{ м}^2/\text{с}^2} = 19,5 \text{ м/с}$$

Из рисунка 1.3 определим угол β , образуемый вектором скорости v_B с осью Ox :

$$\sin\beta = \frac{v_{yB}}{v_B} = \frac{\sqrt{(v_0 \sin\varphi)^2 + 2gH}}{\sqrt{v_0^2 + 2gH}}$$

$$\sin\beta = 0,85 \Rightarrow \beta = \arcsin 0,85 = 57^\circ 40'$$

Построим в точке B «треугольник ускорений». Вектор тангенциального ускорения a_τ направлен вдоль вектора мгновенной скорости в данной точке, то есть по касательной к траектории; вектор нормального ускорения a_n перпендикулярен вектору мгновенной скорости v_B . Из рисунка видно, что:

$$a_\tau = g \sin\beta = \frac{g v_{yB}}{v_B}$$

$$a_n = g \cos\beta = \frac{g v_{0x}}{v_B} = \frac{c g v_0 \sin\varphi}{\sqrt{v_0^2 + 2gH}}$$

$$a_\tau = 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 0,85 = 8,3 \text{ м/с}^2$$

$$a_n = \frac{9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 12 \text{ м/с} \cdot 0,867}{\sqrt{(12 \text{ м/с})^2 + 2 \cdot 9,81 \cdot 12 \text{ м}^2/\text{с}^2}} = 5,25 \text{ м/с}^2$$

Радиус кривизны траектории в точке приземления определяем из уравнения:

$$a_n = \frac{v_B^2}{R}$$

Отсюда:

$$R = \frac{19,5^2 \text{ м}^2/\text{с}^2}{5,25 \text{ м/с}^2} = 72,5 \text{ м}$$

Ответ: $v_B = 19,5 \text{ м/с}$, $\beta = 57^\circ 40'$, $a_\tau = 8,3 \text{ м/с}^2$, $a_n = 5,25 \text{ м/с}^2$, $R = 72,5 \text{ м}$.

11. Тонкий стержень массой 300 г и длиной 50 см вращается с угловой скоростью 10 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: $m = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг}$, $l = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$, $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}$.

Найти: ω_2 .

Решение. Используем закон сохранения момента количества движения:

$$\sum_{i=1}^n J_i \omega_i = \text{const} \quad (1)$$

где J_i – момент инерции стержня относительно оси вращения.

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

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

По теореме Штейнера, $J = J_0 + md^2$, где J – момент инерции тела относительно произвольной оси вращения; J_0 – момент инерции относительно параллельной оси, проходящей через центр масс тела относительно от центра масс до выбранной оси вращения.

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

$$J_2 = J_0 + md^2;$$

$$J_2 = \frac{ml^2}{12} + m\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{ml^2}{3} \quad (4)$$

Подставим формулы (3) и (4) в формулу (2):

$$\frac{ml^2\omega_1}{12} = \frac{ml^2\omega_2}{3}$$

Откуда:

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

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

12. Маховик массой 4 кг свободно вращается с частотой 720 мин⁻¹ вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр. Массу маховика можно считать равномерно распределенной по его ободу радиусом 40 см. Через 30 с под действием тормозящего момента маховик остановился. Найти тормозящий момент и число оборотов, которое сделает маховик до полной остановки.

Дано: $\omega = 0$, $m = 4 \text{ кг}$, $n = 720 \text{ мин}^{-1} = 12 \text{ с}^{-1}$; $\Delta t = 30 \text{ с}$, $R = 0,4 \text{ м}$.

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 маховика относительно оси, проходящей через центр масс;

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

По условию задачи, $\Delta\omega = -\omega_0$, где ω_0 – начальная угловая скорость, так как конечная угловая скорость $\omega = 0$. Выразим начальную угловую скорость через частоту вращения маховика, тогда $\omega_0 = 2\pi n$ и $\Delta\omega = 2\pi n$. Момент инерции

маховика $J = mR^2$, где m – масса маховика; R – его радиус. Тогда формула (1) примет вид $mR^2 2\pi n = M\Delta t$, откуда:

$$M = \frac{2\pi n m R^2}{\Delta t}$$
$$M = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 12 \text{ с}^{-1} \cdot 4 \text{ кг} \cdot 0,16 \text{ м}^2}{30 \text{ с}} = 1,61 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Угол поворота, то есть угловой путь φ , за время вращения маховика до остановки может быть определен по формуле для равнозамедленного вращения (2):

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

где ε – угловое ускорение.

По условию задачи $\varphi = \omega_0 t - \varepsilon \Delta t$, $\omega = 0$, $\varepsilon \Delta t = \omega_0$. Тогда выражение (2) может быть записано как:

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

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

$$N = \frac{n \Delta t}{2}$$
$$N = \frac{12 \text{ с}^{-1} \cdot 30 \text{ с}}{2} = 180.$$

Ответ: $M = 1,61 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $N = 180$.

2 ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

2.1 Основные законы и формулы

Количество вещества	$\nu = \frac{N}{N_A} \text{ или } \nu = \frac{m}{M}$
Уравнение Клапейрона-Менделеева (уравнение состояния идеального газа)	$pV = \left(\frac{m}{M}\right) RT$
Закон Дальтона	$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$
Концентрация молекул	$n = N/V = N_A \rho / M$
Уравнение молекулярно-кинетической теории газов	$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 =$ $= \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = nkT$
Средняя кинетическая энергия молекулы	$\langle \varepsilon \rangle = ikT/2$
Внутренняя энергия идеального газа	$U = imRT/(2M)$
Средняя квадратичная скорость молекул	$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3kT/m_0} = \sqrt{3RT/M}$
Средняя арифметическая скорость молекул	$\langle v \rangle = \sqrt{8kT/\pi m_0} =$ $= \sqrt{8RT/(\pi M)}$
Наиболее вероятная скорость молекул	$v_B = \sqrt{2kT/m_0} = \sqrt{2RT/M}$
Средняя длина свободного пробега молекулы	$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}$
Среднее число соударений молекулы за одну секунду	$\langle Z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$

Распределение молекул
в потенциальном поле сил
(распределение Больцмана)

$$n = n_0 e^{-E_n/(kT)}$$

Барометрическая формула

$$p = p_0 e^{-mg(h-h_0)/(kT)}$$

Уравнение диффузии (закон Фика)

$$dm = -D \frac{dc}{dx} S dt$$

Сила внутреннего трения
в жидкости и газе

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S$$

Уравнение теплопроводности

$$dQ = -\frac{dT}{dx} S dt$$

Коэффициент диффузии

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

Коэффициент внутреннего трения
(динамическая вязкость)

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

Коэффициент теплопроводности

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

Теплоемкость молярная изохорная

$$C_V = \frac{iR}{2}; C_V = c_V M$$

Теплоемкость молярная изобарная

$$C_P = \frac{(i+2)R}{2}; C_P = c_P M$$

Первое начало термодинамики

$$Q = \Delta U + A$$

здесь $\Delta U = m C_V \frac{\Delta T}{M}$

$$A = p \Delta V$$

Работа расширения газа
при изобарном процессе

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

$$= (m/M) R (T_2 - T_1)$$

Работа расширения газа
при изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{M} R T \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} R T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Работа расширения газа
при адиабатном процессе

$$A = \frac{m}{M} \frac{R T_1}{(\gamma - 1)} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$$

Уравнение Пуассона, связывающее
параметры идеального газа
при адиабатном процессе

$$\frac{T}{p^{(\gamma-1)\gamma}} = \text{const}$$

Коэффициент полезного действия
цикла Карно

$$\eta = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T}$$

Изменение энтропии

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса

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

Критические параметры

$$p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2}; T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27bR}; \\ V_{\text{кр}} = 3b$$

Собственный объем молекулы

$$V = \frac{b}{4N_A} = \frac{\pi d^3}{6}$$

2.2 Примеры решения задач

1. В сосуде объемом 2 м^3 находится смесь 4 кг гелия и 2 кг водорода при температуре 27°C . Определить давление и молярную массу смеси газов.

Дано: $V = 2 \text{ м}^3$; $m_1 = 4 \text{ кг}$; $M_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $m_2 = 2 \text{ кг}$; $M_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $T = 300 \text{ К}$.

Найти: p, M .

Решение. Воспользуемся уравнением Клапейрона-Менделеева, применив его к гелию и водороду:

$$p_1 V = \frac{m_1 RT}{M_1}, \quad (1)$$

$$p_2 V = \frac{m_2 RT}{M_2} \quad (2)$$

где p_1 – парциальное давление гелия;

m_1 – масса гелия;

M_1 – молярная масса;

V – объем сосуда;

T – температура газа;

$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – молярная газовая постоянная;

p_2 – парциальное давление водорода;

m_2 – масса водорода;

M_2 – молярная масса водорода.

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 Дальтона давление смеси равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав смеси (3):

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

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 (5):

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

где v_1 и v_2 – число молей гелия и водорода соответственно.

Число молей газов найдем по формулам (6), (7):

$$v_1 = \frac{m_1}{M_1}, \quad (6)$$

$$v_2 = \frac{m_2}{M_2} \quad (7)$$

Подставляя выражения (6) и (7) в уравнение (5) найдем:

$$M = \frac{m_1 + m_2}{m_1/M_1 + m_2/M_2} \quad (8)$$

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

$$p = \left(\frac{4 \text{ кг}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} + \frac{2 \text{ кг}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \right) \frac{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 300 \text{ К}}{2 \text{ м}^3} =$$

$$= 24,93 \cdot 10^5 \text{ Па} = 2493 \text{ кПа}$$

$$M = \left(\frac{4 \text{ кг} + 2 \text{ кг}}{4 \text{ кг} / (4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}^{-1}) + 2 \text{ кг} / (2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}^{-1})} \right) =$$
$$= 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

Ответ: $p = 2493 \text{ кПа}$, $M = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

2. Чему равны средние кинетические энергии поступательного и вращательного движения молекул, содержащихся в 2 кг водорода при температуре 400 К?

Дано: $m = 2 \text{ кг}$, $T = 400 \text{ К}$, $M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Найти: $\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$, $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle$.

Решение. Считаем водород идеальным газом. Молекула водорода – двухатомная; связь между атомами считаем жесткой. Тогда число степеней свободы молекулы водорода равно 5. В среднем на одну степень свободы приходится энергия:

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{kT}{2}$$

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Поступательному движению приписывается три ($i = 3$), а вращательному две ($i = 2$) степени свободы. Тогда энергия одной молекулы составит:

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{3}{2} kT; \quad \langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = \frac{2}{2} kT$$

Число молекул, содержащихся в массе газа:

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

где ν – число молей; N_A – постоянная Авогадро.

Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул водорода будет определяться выражением (1):

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

где $R = kN_A$ – молярная газовая постоянная.

Средняя кинетическая энергия вращательного движения молекул водорода составит:

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = \frac{m}{M} RT \quad (2)$$

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

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{3 \cdot 2 \text{ кг} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 400 \text{ К}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}} = 49,86 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 4986 \text{ кДж}$$

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = \frac{2 \text{ кг} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 400 \text{ К}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}} = 33,24 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 3324 \text{ кДж}$$

Ответ: $\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = 4986 \text{ кДж}$, $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 3324 \text{ кДж}$.

3. Определить среднюю длину свободного пробега молекул и число соударений за 1 с, происходящих между всеми молекулами кислорода, находящегося в сосуде емкостью 2 л при температуре 27 °С и давлении 100 кПа.

Дано: $V = 2 \text{ л} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$, $T = 300 \text{ К}$, $p = 10^5 \text{ Па}$,
 $d = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Найти: $\langle \lambda \rangle$, Z .

Решение. Средняя длина свободного пробега молекул кислорода вычисляется по формуле (1):

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

где d – эффективный диаметр молекулы кислорода;

n – число молекул в единице объема, которое можно определить из уравнения $p = nkT$

Имеем:

$$n = \frac{p}{kT} \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана.

Подставляя выражение (2) в выражение (1), получим:

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

Число соударений Z , происходящих между всеми молекулами за одну секунду, составит:

$$Z = \frac{1}{2} \langle Z \rangle N \quad (4)$$

где N – число молекул кислорода в сосуде объемом $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;

$\langle Z \rangle$ – среднее число соударений одной молекулы за одну секунду.

Число молекул в сосуде определяется по формуле (5):

$$N = nV \quad (5)$$

Среднее число соударений молекулы за одну секунду составит:

$$\langle Z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle \lambda \rangle}, \quad (6)$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (6)$$

где $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекулы.

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

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

Подставляя числовые значения, получим:

$$Z = \frac{2 \cdot 3,41 \cdot 2,9^2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \cdot 10^{10} \text{ Па}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{1,38^2 \cdot 10^{-46} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-2} \cdot 9 \cdot 10^4 \text{ К}^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 300 \text{ К}}{3,41 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}}} = 9 \cdot 10^{28} \text{ с}^{-1}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К} \cdot 300 \text{ К}}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 2,9^2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 3,56 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

Ответ: $Z = 9 \cdot 10^{28} \text{ с}^{-1}$; $\langle \lambda \rangle = 3,56 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

4. Определить коэффициенты диффузии и внутреннего трения азота, находящегося при температуре $T = 300 \text{ К}$ и давлении 10^5 Па .

Дано: $p_0 = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$, $M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$, $T = 300 \text{ К}$, $p = 10^5 \text{ Па}$, $d = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Найти: D , η .

Решение. Коэффициент диффузии определяется по формуле (1):

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

$$\text{при этом } \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2)$$

где $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекул;

$\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

Для нахождения $\langle \lambda \rangle$ воспользуемся формулой, взятой из решения примера 3:

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

Подставляя выражения (2) и (3) в выражение (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 определяется из формулы (5):

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

где ρ – плотность газа при температуре 300 К и давлении 10^5 Па.

Для нахождения ρ воспользуемся уравнением состояния идеального газа. Запишем его для двух состояний азота – при нормальных условиях ($T_0 = 273$ К, $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па) и условиях задачи:

$$p_0 V_0 = \frac{m}{M} R T_0, \quad (6)$$

$$p V = \frac{m}{M} R T \quad (7)$$

Учитывая, что $\rho_0 = \frac{m}{V_0}$; $\rho = \frac{m}{V}$, имеем:

$$p = \frac{\rho_0 p T}{\rho T} \quad (7)$$

Коэффициент внутреннего трения газа может быть выражен через коэффициент диффузии:

$$\eta = D \rho = \frac{D \rho_0 p T_0}{p_0 T} \quad (8)$$

Подставляя числовые значения в выражения (4) и (8), получим:

$$D = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 300 \text{ К}}{3 \cdot 3,14 \cdot 3,1^2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \cdot 10^5 \text{ Па}} \sqrt{\frac{8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 300 \text{ К}}{3,14 \cdot 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}} = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\eta = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} \cdot 1,25 \text{ кг/м}^3 \cdot \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 273 \text{ К}}{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 300 \text{ К}} = 5,23 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$$

Ответ: $D = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\eta = 5,23 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$.

5. Кислород массой 160 г нагревают при постоянном давлении от 320 до 340 К. Определить количество теплоты, поглощенное газом, изменение внутренней энергии и работу расширения газа.

Дано: $m = 160 \text{ г} = 16 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$, $T_1 = 320 \text{ К}$, $T_2 = 340 \text{ К}$.

Найти: Q , ΔU , A .

Решение. Количество теплоты, необходимое для нагревания газа при постоянном давлении, определяем из уравнения (1):

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

Здесь c_p и $C_p = Mc_p$ – удельная и молярная теплоемкости газа при постоянном давлении; $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса кислорода. Для всех двухатомных газов:

$$C_p = \frac{7}{2}R; C_p = 3,5 \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} = 29 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

Изменение внутренней энергии газа находим по формуле (2):

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

где C_v – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Для всех двухатомных газов:

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

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:

$$pV_1 = \frac{m}{M}RT_1, \quad (3)$$

$$pV_2 = \frac{m}{M}RT_2 \quad (4)$$

Почленным вычитанием выражения (4) из выражения (3) находим:

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

Следовательно:

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

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

$$Q = \frac{16 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 29 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot (340 \text{ К} - 320 \text{ К}) = 2900 \text{ Дж}$$
$$\Delta U = \frac{16 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 20,8 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot (340 \text{ К} - 320 \text{ К}) = 2080 \text{ Дж}$$
$$A = \frac{16 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot (340 \text{ К} - 320 \text{ К}) = 840 \text{ Дж}$$

Ответ: $Q = 2900 \text{ Дж}$, $\Delta U = 2080 \text{ Дж}$, $A = 840 \text{ Дж}$.

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) адиабатно.

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

Найти: ΔU .

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

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

Величину ΔU можно определить, зная массу газа m , удельную теплоемкость при постоянном объеме c_v и изменении температуры ΔT :

$$\Delta U = mc_v T \quad (2)$$

Однако удобнее изменение внутренней энергии определять через молярную теплоемкость C_v , которая может быть выражена через число степеней свободы:

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

Подставляя величину c_v из формулы (3) в формулу (2), получаем выражение (4):

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

Изменение внутренней энергии зависит от характера процесса, при котором идет расширение газа. При изобарном расширении газа, согласно первому закону термодинамики, часть количества теплоты идет на изменение внутренней энергии ΔU , которая выражается формулой (4). Найти ΔU для аргона по формуле (4) нельзя, так как масса газа и температура в условии задачи не даны. Поэтому необходимо провести преобразование формулы (4).

Запишем уравнение Клапейрона-Менделеева для начального и конечного состояний газа:

$$\begin{aligned} pV_1 &= \frac{m}{M} RT_1 \text{ и } pV_2 = \frac{m}{M} RT_2 \\ \text{или } p(V_2 - V_1) &= \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив формулу (5) в формулу (4), получим выражение (6):

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

Это уравнение является расчетным для определения ΔU при изобарном расширении.

При адиабатном расширении газа теплообмена с внешней средой не происходит, поэтому $Q = 0$. Уравнение (1) запишется 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 ΔU):

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

Формула работы для адиабатного процесса имеет вид:

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] \quad (9)$$

где γ – показатель степени адиабаты.

Показатель степени адиабаты равен соотношению теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i + 2}{i}$$

Для аргона – одноатомного газа ($i = 3$) имеем $\gamma = 1,67$.

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

$$\Delta U = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] \quad (10)$$

Для определения работы расширения аргона, формулу (10) следует преобразовать, учитывая при этом параметры, данные в условии задачи. Применив уравнение Клапейрона-Менделеева для данного случая, получим выражение для подсчета изменения внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] \quad (11)$$

Подставляя числовые значения в выражения (6) и (11), получим

а) при изобарном расширении:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 121 \text{ Дж}$$

б) при адиабатном расширении:

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

Ответ: а) $\Delta U = 121$ Дж; б) $\Delta U = -44,6$ Дж.

7. Температура нагревателя тепловой машины 500 К. Температура холодильника 400 К. Определить КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, и полную мощность машины, если нагреватель каждую секунду передает ей 1675 Дж теплоты.

Дано: $T = 500 \text{ К}$, $T_0 = 400 \text{ К}$, $Q = 1675 \text{ Дж}$.

Найти: η , N .

Решение. КПД машины определяется по формуле (1) или формуле (2):

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{A}{Q} \quad (2)$$

Из выражений (2) и (1) находим:

$$A = \eta Q = \frac{T - T_0}{T} Q$$

Произведем вычисления:

$$\eta = \frac{500 \text{ К} - 400 \text{ К}}{500 \text{ К}} = 0,2$$
$$A = 0,2 \cdot 1675 \text{ Дж} = 335 \text{ Дж}$$

Эта работа совершается за одну секунду, следовательно, полная мощность машины 335 Вт.

Ответ: $\eta = 0,2$, $N = 335 \text{ Вт}$.

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 воды T_2 , а температура смеси θ . Определим температуру смеси, исходя из уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned} mc(T_2 - \theta) &= mc(\theta - T_2) \text{ или } T_2 - \theta = \theta - T_2 \\ \theta &= \frac{T_1 + T_2}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

Изменение энтропии, происходящее при охлаждении горячей воды, составит:

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

Изменение энтропии, происходящее при нагревании холодной воды, будет равно:

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

Тогда изменение энтропии системы равно:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \left(\frac{\theta}{T_1} \right) + cm \ln \left(\frac{\theta}{T_2} \right) = cm \ln \frac{\theta^2}{T_1 T_2}$$

Или с учетом соотношения (1) имеем:

$$\Delta S = cm \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2}; \text{ так как } (T_1 + T_2)^2 > 4T_1 T_2, \text{ то } \Delta S > 0.$$

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

Дано: $T_{\text{кр}} = 126 \text{ К}$, $p_{\text{кр}} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ МПа}$.

Найти: d .

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

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

Постоянную b в уравнении Ван-дер-Ваальса с достаточной степенью точности считают равной учетверенному собственному объему одного моля газа.

В одном моле газа находится $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул ($N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$), следовательно, объем одной молекулы равен:

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3 = \frac{b}{4N_a}.$$

Откуда:

$$d = \sqrt[3]{\frac{3b}{2\pi N_A}}$$

Постоянная:

$$b = \frac{T_{\text{кр}} R}{8p_{\text{кр}}}$$

Тогда:

$$d = \sqrt[3]{\frac{3T_{\text{кр}} R}{16\pi p_{\text{кр}} N_A}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 126 \text{ К} \cdot 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}}{16 \cdot 3,14 \cdot 3,4 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 6,02 \text{ моль}^{-1} \cdot 10^{23}}} = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Ответ: $d = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

3 ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

3.1 Основные законы и формулы

Закон Кулона

$$F = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2)$$

Напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \vec{F} / Q_0$$

Напряженность поля точечного заряда

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

Напряженность поля бесконечно
длинной заряженной нити

$$E = \tau / (2\pi\epsilon\epsilon_0 r)$$

Напряженность поля равномерно
заряженной плоскости

$$E = \sigma / (2\epsilon\epsilon_0)$$

Напряженность поля между двумя
равномерно и разноименно
заряженными бесконечными
параллельными плоскостями

$$E = \sigma / (\epsilon\epsilon_0)$$

Напряженность поля, создаваемого
металлической заряженной сферой
радиусом R на расстоянии r от
ее центра: на поверхности сферы ($r = R$)
вне сферы ($r > R$)

$$E = Q / (4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2)$$

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

Смещение электрическое

$$D = \epsilon\epsilon_0 E$$

Поток напряженности
электрического поля

$$\Phi = \int_S E_n dS$$

Работа перемещения заряда
в электрическом поле
из точки M в точку N

$$A = Q \int_M^N E_n d\ell;$$

$$A = Q(\varphi_M - \varphi_N)$$

Потенциал поля, создаваемого
точечным зарядом

$$\varphi = Q / (4\pi\epsilon\epsilon_0 r)$$

Потенциал электрического поля
металлической поллой сферы
радиусом R на расстоянии r
от центра сферы: на поверхности
и внутри сферы ($r \leq R$)
вне сферы ($r > R$)

$$\varphi = Q / (4\pi\epsilon\epsilon_0 R)$$

$$\varphi = Q / (4\pi\epsilon\epsilon_0 r)$$

Связь потенциала с напряженностью
поля

$$E = -\frac{d\varphi}{d\ell}; \quad E = -\text{grad } \varphi$$

Сила притяжения между двумя
разноименно заряженными
обкладками конденсатора

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

Електроемкость
уединенного проводника

$$C = Q / \varphi$$

Електроемкость
плоского конденсатора

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

Електроемкость
слоистого конденсатора

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

Електроемкость батареи параллельно
соединенных конденсаторов

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

Формула для определения
электроемкости батареи
последовательно соединенных
конденсаторов

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

Энергия поля заряженного проводника

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

Энергия поля заряженного
конденсатора

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

Энергия поля поляризованного
диэлектрика

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

Объемная плотность энергии
электрического поля

$$\omega = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon\epsilon_0}$$

Сила тока

$$I = dQ / dt$$

3 Электростатика.

Постоянный ток

Плотность тока в металле

$$j = en < v >$$

Закон Ома для замкнутой (полной) цепи

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

Закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \vec{E}/\rho$$

Закон Джоуля-Ленца
в дифференциальной форме

$$\omega = \gamma E^2$$

Закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 R t = U^2 t / R$$

Термоэлектродвижущая сила

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \Delta T$$

Сопротивление однородного
проводника

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

Удельная проводимость

$$\gamma = 1/\rho$$

Зависимость удельного сопротивления
от температуры

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)$$

Работа тока

$$A = IU t = I^2 R t = U^2 t / R$$

Полная мощность, выделяющаяся
в цепи

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

Объединенный закон электролиза
(объединенный закон Фарадея)

$$M = \frac{1}{F} \frac{A}{Z} Q$$

Коэффициент полезного действия
источника тока

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

Плотность тока в газе
при отсутствии насыщения

$$j = Qn(b_+ + b_-)E$$

Удельная проводимость
собственных полупроводников

$$\gamma = en(b_n + b_p)$$

Удельная проводимость электролитов

$$\gamma = Q\alpha n(b_+ + b_-)$$

3.2 Примеры решения задач

1. Два одинаковых положительных заряда $0,1 \text{ мкКл}$ находятся в воздухе на расстоянии 8 см друг от друга. Определить напряженность поля в точке O , находящейся на середине отрезка, соединяющего заряды, и в точке A , расположенной на расстоянии 5 см от зарядов (рис. 3.1).

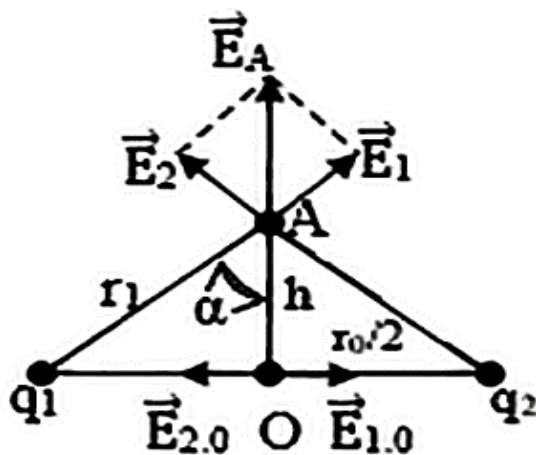


Рисунок 3.1

Дано: $q_1 = q_2 = 10^{-7} \text{ Кл}$, $\varepsilon = 1$, $r_0 = 0,08 \text{ м}$, $r_1 = 0,05 \text{ м}$.

Найти: E_0 , E_A .

Решение. Напряженность поля, создаваемого зарядами, находится по принципу суперпозиции. Результирующая напряженность $\vec{E}$ равна векторной сумме напряженностей, создаваемых каждым зарядом в данной точке поля:

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

Напряженность электрического поля, создаваемая отдельным зарядом, определяется по формуле (2):

$$E_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2} \quad (2)$$

Чтобы найти напряженность поля в точке O , надо сначала построить векторы напряженностей. Так как заряды q_1 и q_2 положительные, векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены от точки O в сторону от зарядов, создающих это поле (рис. 3.1).

Кроме того, по условию задачи, заряды равны и расположены на одинаковом расстоянии от точки O . Поэтому с учетом направления векторов из формулы (1) получаем:

$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{1,0} - \vec{E}_{2,0}; \text{ но так как } \vec{E}_{1,0} = \vec{E}_{2,0}, \text{ то } \vec{E}_0 = 0.$$

В точке A напряженность поля вычисляется по формуле (1). Построение векторов проводится аналогично. Результирующий вектор напряженности $\vec{E}_A$ является диагональю параллелограмма (рис. 3.1), следовательно, $\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ или $E_A = 2E_1 \cos\alpha$, так как $\vec{E}_1 = \vec{E}_2$.

Из рисунка 3.1 имеем:

$$\cos\alpha = \frac{h}{r_1}$$

Напряженность поля в точке A определяем по формуле (3):

$$E_A = 2 \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1^2} \frac{h}{r_1} \quad (3)$$

Подставив в формулу (3) числовые значения, получим:

$$E_A = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot 0,03 \text{ м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,05^3 \text{ м}^3} = 4,32 \cdot 10^5 \text{ В/м} = 432 \text{ кВ/м}$$

Ответ: $E_0 = 0$; $E_A = 432 \text{ кВ/м}$.

2. *Емкость плоского воздушного конденсатора $C = 1 \text{ нФ}$, расстояние между обкладками 4 мм. На помещенный между обкладками конденсатора*

заряд $q = 4,9$ нКл действует сила $F = 98$ мкН. Площадь обкладки 100 см². Определить: напряженность поля и разность потенциалов между обкладками; энергию поля конденсаторов и объемную плотность энергии.

Дано: $F = 9,8 \cdot 10^{-5}$ Н, $q = 4,9 \cdot 10^{-9}$ Кл, $C = 10^{-9}$ Ф, $S = 10^{-2}$ м², $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $\varepsilon = 1$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Найти: E , U , W , ω .

Решение. Поле между обкладками конденсатора считаем однородным. Напряженность поля конденсатора определяется из выражения: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, где $\vec{F}$ – сила, с которой поле действует на заряд q , помещенный между обкладками конденсатора. Подставив числовые значения, найдем:

$$E = \frac{9,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н}}{4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}} = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 20 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

Разность потенциалов между обкладками $U = E \cdot d$. Подставив числовые значения, получим:

$$U = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 80 \text{ В}$$

Энергия поля конденсатора определяется:

$$W_3 = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S U^2}{2d}$$

Подставив числовые значения, получим:

$$W_3 = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 80^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 7,08 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} = 70,8 \text{ нДж}$$

Плотность энергии: $\omega = \frac{W_3}{V} = \frac{W_3}{Sd}$, где $V = S \cdot d$ – объем поля конденсатора.

Тогда:

$$\omega = \frac{7,08 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}}{10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1,77 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

Ответ: $E = 20$ кВ/м, $U = 80$ В, $W_3 = 70,8$ нДж, $\omega = 1,77 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³.

3. Найти, как изменятся емкость и энергия плоского воздушного конденсатора, если параллельно его обкладкам ввести металлическую пластину толщиной 1 мм. Площадь обкладки конденсатора и пластины 150 см^2 , расстояние между обкладками 6 мм. Конденсатор заряжен до 400 В и отключен от батареи.

Дано: $\varepsilon = 1$; $d_0 = 10^{-3} \text{ м}$, $S = 150 \text{ см}^2 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $d = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $U = 400 \text{ В}$.

Найти: ΔC , $\Delta W_{\text{Э}}$.

Решение. Емкость и энергия конденсатора при внесении в него металлической пластины изменятся. Это вызвано тем, что при внесении металлической пластины уменьшается расстояние между пластинами от d до $(d - d_0)$ (рис. 3.2).

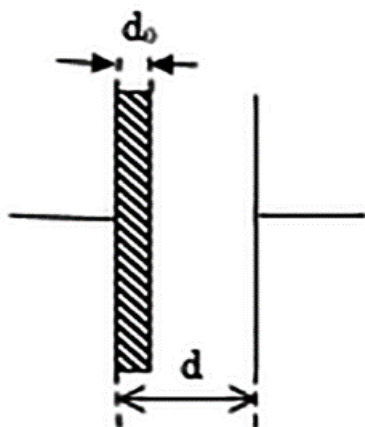


Рисунок 3.2

Используем формулу емкости плоского конденсатора (1):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (1)$$

где S – площадь обкладки;

d – расстояние между обкладками.

В данном случае получим, что изменение емкости конденсатора равно:

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d - d_0} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S d_0}{d(d - d_0)}$$

Подставив числовые значения, получим:

$$\Delta C = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \text{м}^2 \cdot 10^{-3} \text{м}}{6 \cdot 10^{-3} \text{м} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{м}} = 4,42 \cdot 10^{-12} \text{Ф} = 4,42 \text{ пФ}$$

Так как электрическое поле в плоском конденсаторе однородно, плотность энергии во всех его точках одинакова и равна:

$$\omega = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \quad (2)$$

где E – напряженность поля между обкладками конденсатора.

При внесении металлической пластины параллельно обкладкам, напряженность поля осталась неизменной, а объем электрического поля уменьшился на $\Delta V = S(d - d_0) - Sd = -Sd_0$. Следовательно, изменение энергии (конечное значение ее меньше начального) произошло вследствие уменьшения объема поля конденсатора:

$$\Delta W_{\text{э}} = \omega \Delta V = -\frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 S d_0 \quad (3)$$

Напряженность поля E определяется через градиент потенциала:

$$E = -\frac{U}{d} \quad (4)$$

где U – разность потенциалов;

d – расстояние между обкладками.

Формула (3) с учетом выражения (4) принимает вид:

$$\Delta W_{\text{э}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2d^2} S d_0 \quad (5)$$

Подставляя числовые значения в формулу (5), получаем:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{э}} &= -\frac{8,85 \cdot \frac{10^{-12} \text{Ф}}{\text{м}} \cdot 400^2 \text{В}}{2 \cdot 6^2 \cdot 10^{-6} \text{м}^2} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \text{м}^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = \\ &= -2,95 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = -295 \text{ нДж} \end{aligned}$$

Ответ: $\Delta C = 4,42 \text{ пФ}$, $\Delta W_{\text{э}} = -295 \text{ нДж}$.

4. Сила тока в резисторе линейно нарастает за 4 с от 0 до 8 А. Сопротивление резистора – 10 Ом. Определить количество теплоты, выделившееся в резисторе за первые 3 с.

Дано: $t_0 = 0, t_1 = 4, I = 0, I_1 = 8 \text{ А}, t_2 = 3 \text{ с}.$

Найти: $Q.$

Решение. По закону Джоуля-Ленца:

$$dQ = I^2 R dt \quad (1)$$

Так как сила тока является функцией времени, то:

$$I = kt, \quad (2)$$

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{8 \text{ А}}{4 \text{ с}} = 2 \frac{\text{А}}{\text{с}} \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности, численно равный приращению тока в единицу времени.

Следовательно, $dQ = k^2 t^2 R dt$. За первые три секунды выделится количество теплоты:

$$Q = \int_{t_0}^{t_2} k^2 t^2 R dt = k^2 R \int_{t_0}^{t_2} t^2 dt = \frac{k^2 R}{3} (t_2^3 - t_0^3) \quad (4)$$

Подставляя числовые значения в формулу (3), получим:

$$Q = \frac{4 \text{ А}^2 / \text{с}^2 \cdot 100 \text{ Ом} \cdot 27 \text{ с}^3}{3} = 360 \text{ Дж}$$

Ответ: $Q = 360 \text{ Дж}.$

5. Батарея состоит из пяти последовательно соединенных элементов. ЭДС каждого элемента составляет 1,4 В, внутреннее сопротивление – 0,3 Ом. При каком токе полезная мощность батареи равна 8 Вт? Определить наибольшую полезную мощность батареи.

Дано: $\varepsilon_i = 1,4 \text{ В}, r_i = 0,3 \text{ Ом}, P_n = 8 \text{ Вт}, n = 5.$

Найти: $I, P_{n\max}.$

Решение. Полезная мощность батареи определяется по формуле (1):

$$P_n = I^2 R, \quad (1)$$

$$I = \frac{n\varepsilon_i}{nr_i + R} \quad (2)$$

где R – сопротивление внешней цепи;

I – сила тока, текущего в цепи, определяемая по закону Ома (2);

n, ε_i – электродвижущая сила;

nr_i – внутреннее сопротивление n последовательно соединенных элементов.

Выразим сопротивление внешней цепи из формулы (1) и, подставив это выражение в формулу (2), получим:

$$I = \frac{n\varepsilon_i}{nr_i + P_n/I^2}, \quad (3)$$

$$\text{или } I \left(nr_i + \frac{P_n}{I^2} \right) = n\varepsilon_i \quad (4)$$

Преобразуя выражение (4), получим квадратное уравнение относительно силы тока:

$$nr_i I^2 - n\varepsilon_i I + P_n = 0$$

Решая квадратное уравнение, найдем:

$$I_{1,2} = \frac{n\varepsilon_i \pm \sqrt{n^2 \varepsilon_i^2 - 4nr_i P_n}}{2nr_i}$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$I_1 = \frac{5 \cdot 1,4\text{В} + \sqrt{5^2 \cdot 1,4^2\text{В}^2 - 4 \cdot 5 \cdot 0,3\text{Ом} \cdot 8\text{Вт}}}{2 \cdot 5 \cdot 0,3\text{Ом}} = 2,66\text{ А}$$

$$I_2 = \frac{5 \cdot 1,4\text{В} - \sqrt{5^2 \cdot 1,4^2\text{В}^2 - 4 \cdot 5 \cdot 0,3\text{Ом} \cdot 8\text{Вт}}}{2 \cdot 5 \cdot 0,3\text{Ом}} = 2\text{ А}$$

Для того чтобы определить наибольшую полезную мощность батареи, найдем зависимость ее от внешнего сопротивления. Подставим в уравнение (1) выражение (2):

$$P_n = \frac{n^2 \varepsilon_i^2 R}{(nr_i + R)^2} \quad (5)$$

Из этой формулы следует, что при постоянных величинах ε_i и r_i , мощность является функцией одной переменной – внешнего сопротивления R . Известно, что эта функция имеет максимум, если $\frac{dP_n}{dR} = 0$. Следовательно, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dP_n}{dR} &= \frac{n^2 \varepsilon_i^2 (R + nr_i) - 2n^2 \varepsilon_i^2 R}{(R + nr_i)^3} = 0 \\ \text{или } n^2 \varepsilon_i^2 (R + nr_i) - 2n^2 \varepsilon_i^2 R &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, задача сводится к отысканию сопротивления внешней цепи. Из решения уравнения (6) следует $R = r \cdot n_i$. Подставляя найденные значения R в формулу (5), имеем:

$$P_{nmax} = \frac{n \varepsilon_i^2}{4r_i} \quad (7)$$

Производя вычисления, найдем:

$$P_{nmax} = \frac{5 \cdot 1,4^2 \text{ В}^2}{4 \cdot 0,3 \text{ Ом}} = 8,16 \text{ Вт}$$

Ответ: $I_1 = 2,66 \text{ А}$, $I_2 = 2 \text{ А}$, $P_{nmax} = 8,16 \text{ Вт}$.

6. Определить концентрацию дырок в полупроводнике германия при такой температуре, когда его удельное сопротивление равно $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, если подвижности электронов и дырок соответственно равны $0,40$ и $0,20 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Дано: $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $b_n = 0,40 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $b_p = 0,20 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Найти: n .

Решение. Удельная проводимость собственных полупроводников определяется из формулы (1):

$$\gamma = en(b_n + b_p) \quad (1)$$

где b_n и b_p – подвижности электронов и дырок соответственно;

e – заряд электрона;
 n – концентрация свободных электронов, то есть их число в единице объема.

В собственном полупроводнике концентрация дырок равна концентрации свободных электронов.

Учитывая, что удельная проводимость и удельное сопротивление связаны между собой зависимостью (2), получим выражение (3):

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} = en(b_n + b_p) \quad (3)$$

Определим концентрацию дырок по формуле (4):

$$n = \frac{1}{\rho e(b_n + b_p)} \quad (4)$$

Подставив числовые значения величин, найдем:

$$n = \frac{1}{0,50 \text{ м} \cdot \text{м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} (0,40 + 0,20) \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}} = 2,08 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

Ответ: $n = 2,08 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

7. Какова концентрация одновалентных ионов в воздухе, если при напряженности поля 30 В/м плотность тока $j = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$, подвижность ионов:

$$b_+ = 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}, b_- = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Дано: $E = 30 \text{ В/м}$, $j = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$, $b_+ = 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, $b_- = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Найти: n .

Решение. Плотность тока в газе при отсутствии насыщения составляет:

$$j = Qn(b_+ + b_-)E \quad (1)$$

где n – концентрация ионов, то есть число ионов одного знака в единице объема;

3 Электростатика.

Постоянный ток

b_+ , b_- – подвижности положительных и отрицательных ионов;

E – напряженность электрического поля в газе;

q – абсолютное значение заряда каждого иона.

По условию задачи следует определить концентрацию одновалентных ионов, находящихся в воздухе, то есть $q = e$ (e – заряд электрона). Тогда:

$$j = en(b_+ + b_-)E \quad (2)$$

Из выражения (2) определим:

$$n = \frac{j}{eE(b_+ + b_-)}$$

Подставив числовые значения, найдем:

$$n = \frac{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 30 \text{ В/м} \cdot (1,4 + 1,2) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \text{ с}^{-1}} = 12,8 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}$$

Ответ: $n = 12,8 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}$.

4 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

4.1 Основные законы и формулы

Закон Ампера

$$dF = BIdl \sin \alpha$$

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

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

Магнитный момент контура с током

$$p_m = IS$$

Связь магнитной индукции с
напряженностью магнитного поля

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

Закон Био-Савара-Лапласа

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

Магнитная индукция в центре
кругового тока

$$B = \mu\mu_0 I / (2R)$$

Магнитная индукция поля, созданного
бесконечно длинным прямым
проводником с током

$$B = \mu\mu_0 I / (2\pi r)$$

Магнитная индукция поля, созданного
отрезком проводника с током

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Магнитная индукция поля бесконечно
длинного соленоида и тороида

$$B = \mu\mu_0 nI$$

Сила взаимодействия двух
прямолинейных бесконечно
длинных параллельных проводников
с током

$$F = \mu\mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi d)$$

Вектор Пойтинга

$$\vec{P} = \vec{E} \cdot \vec{H}$$

Напряженность магнитного поля,
создаваемого движущимся зарядом

$$H = Qv \sin \alpha / (4\pi r^2)$$

Сила Лоренца

$$\vec{F}_L = Q\vec{E} + Q\vec{v} \cdot \vec{B}$$

Магнитный поток однородного
магнитного поля

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

Работа по перемещению контура
с током в магнитном поле

$$A = I\Delta\Phi$$

Основной закон электромагнитной
индукции

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt}$$

Потокосцепление

$$\psi = n\Phi$$

Потокосцепление соленоида

$$\psi = LI$$

Электродвижущая сила самоиндукции

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

Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 l S$$

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

$$Q = -\Delta\psi/R$$

Мгновенное значение силы тока в цепи,
обладающей сопротивлением R
и индуктивностью L

$$I = I_0 e^{-Rt/L} + \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

Энергия магнитного поля

$$W_M = LI^2/2$$

Объемная плотность энергии
магнитного поля

$$\omega = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{(2\mu\mu_0)} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Намагниченность	$J = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n p_{m_i}$
Магнитная восприимчивость среды	$\kappa = \mu - 1$
Период электромагнитных колебаний в контуре (формула Томсона)	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Длина волны	$\lambda = vT$
Скорость распространения электромагнитных волн в среде	$v = c/\varepsilon\mu$
Уравнение гармонического колебания	$s = A \sin(\omega t + \varphi_0)$
Полная энергия при гармоническом колебании	$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$
Уравнение бегущей волны	$s = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{\lambda} \right)$

4.2 Примеры решения задач

1. Изолированный прямолинейный проводник изогнут в виде прямого угла со стороной длиной 20 см. В плоскости угла помещен кольцевой проводник радиусом 10 см, так, что стороны угла являются касательными к кольцевому (рис. 4.1). Найти индукцию в центре кольца. Силы токов в проводниках равны 2 А. Влияние подводящих проводов не учитывать.

Дано: $l = 0,2$ м, $r_0 = 0,1$ м, $\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$, $I_1 = I_2 = I = 2$ А.

Найти: B .

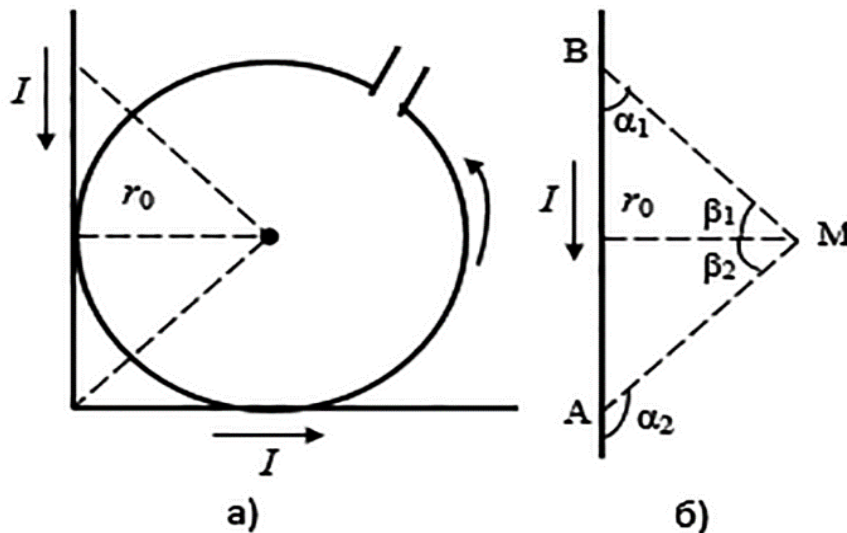


Рисунок 4.1

Решение. Индукция dB в точке поля от элемента проводника dl с током I (проводник имеет произвольную конфигурацию) определяется по закону Био-Савара-Лапласа (1):

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2} \quad (1)$$

где r – модуль радиуса-вектора, проведенного из элемента в точку, где определяется индукция магнитного поля;

α – угол составленный векторами dl и r ;

μ_0 – магнитная постоянная.

Направление вектора индукции перпендикулярно плоскости, содержащей dl и r , и определяется правилом правого винта. Например, в центре окружности (рис. 4.1, а) векторы индукции от всех элементов перпендикулярны плоскости окружности и направлены на нас. Интегрируя выражение (1), получаем индукцию в центре окружности радиуса r_0 :

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2r_0} \quad (2)$$

Индукция, создаваемая в точке M конечным отрезком AB прямого проводника на расстоянии r_0 от него (рис. 4.2, б), равна:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$$

Эту же зависимость в некоторых случаях удобнее записать в виде выражения (3):

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\sin\beta_1 + \sin\beta_2) \quad (3)$$

Вектор индукции в точке M перпендикулярен плоскости, в которой лежат проводник AB и r_0 , и совпадает по направлению с B_1 .

По условию задачи $\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$, и индукция от двух сторон угла составляет:

$$B_3 = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{4\pi r_0 \cdot 2} + \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{4\pi r_0 \cdot 2} = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{4\pi r_0} \quad (4)$$

Так как направления векторов индукции полей, создаваемых проводниками, совпадают, то результирующая индукция в центре кольца равна сумме $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_3$, или:

$$B = B_1 + B_3 = \frac{\mu_0 I}{2r_0} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \right)$$
$$B = \frac{12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 2\text{А}}{2 \cdot 0,1 \text{ м}} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot 3,14} \right) = 15,32 \cdot 10^{-6} = 15,32 \text{ мкТл}$$

Ответ: $B = 15,32 \text{ мкТл}$.

2. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 10 см друг от друга, текут токи силой 5 А в каждом. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого токами в точке, лежащей посередине между проводниками в случаях: 1) проводники параллельны и токи текут в одном направлении (рис. 4.2, а); 2) проводники перпендикулярны, направления токов показаны на рисунке 4.2, б.

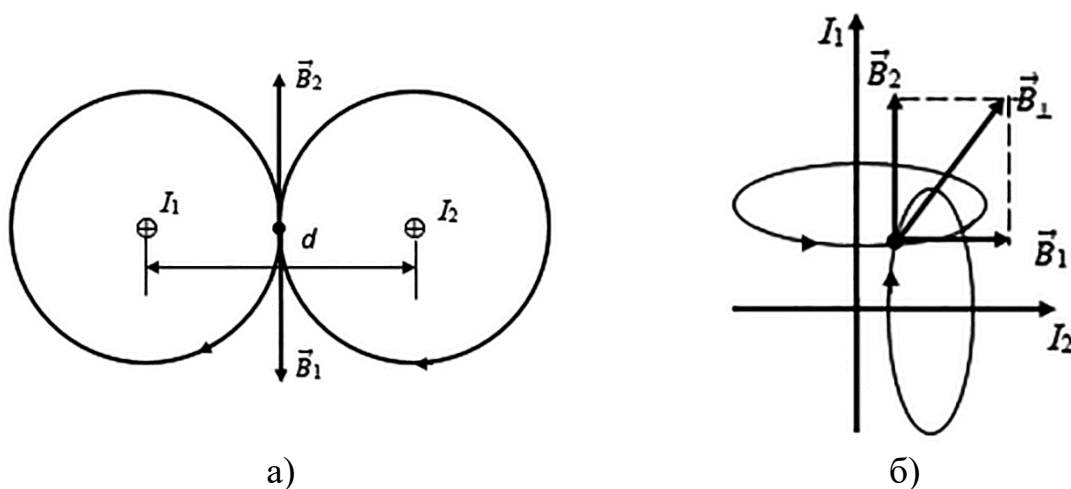


Рисунок 4.2

Дано: $d = 0,1$ м, $I_1 = I_2 = I = 5$ А.

Найти: $B_{||}$ и $B_{\perp}$.

Решение. Результирующая индукция магнитного поля в данной точке равна векторной сумме индукций полей, создаваемых каждым током в отдельности:

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

где $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ – индукции полей, создаваемых соответственно токами I_1 и I_2 .

Если токи текут по параллельным проводникам в отдельном направлении, то применив правило правого винта, определяем направления $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$. Как видно из рисунка 4.2, а, $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ направлены в противоположные стороны, поэтому векторная сумма (1) в данном случае может быть заменена алгебраической:

$$B_{||} = (B_1 - B_2) \quad (2)$$

Индукции полей, создаваемых бесконечно длинными проводниками, находим по формуле (3):

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2r_1}; B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2r_2} \quad (3)$$

где r_1 и r_2 – соответственно расстояния от проводников до точки, где определяется индукция магнитного поля.

Согласно условию задачи: $r_1 = r_2 = r$, тогда:

$$B = \left| \frac{\mu_0 I}{2r} - \frac{\mu_0 I}{2r} \right| = 0$$

В случае, когда проводники перпендикулярны (рис. 4.2, б), результирующая индукция в точке, лежащей посередине между проводниками, равна:

$$B_{\perp} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$$
$$\text{или } B_{\perp} = \sqrt{\left(\frac{\mu_0 I}{2 \pi r}\right)^2 + \left(\frac{\mu_0 I}{2 \pi r}\right)^2} = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \sqrt{2} \quad (4)$$

Подставляя числовые значения, получаем:

$$B_{\perp} = \frac{12,56 \text{ Гн/м} \cdot 5 \text{ А} \sqrt{2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 27,63 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} = 27,63 \text{ мкТл}$$

Ответ: $B_{\parallel} = 0$, $B_{\perp} = 27,63 \text{ мкТл}$.

3. Пройдя ускоряющую разность потенциалов 3,52 кВ, электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Индукция поля – 0,01 Тл, радиус траектории (r) – 2 см. Определить удельный заряд электрона.

Дано: $U = 3,52 \cdot 10^3 \text{ В}$, $B = 0,01 \text{ Тл}$, $r = 2 \text{ см}$.

Найти: $\frac{e}{m}$.

Решение. Удельным зарядом частицы называется величина, равная отношению заряда к массе, то есть $\frac{e}{m}$.

В магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ на заряд, движущийся со скоростью v перпендикулярно линиям индукции, действует сила Лоренца: $F_{\text{л}} = Bev$. Под действием этой силы заряд перемещается по дуге окружности. Так как при

этом сила Лоренца вызывает центростремительное ускорение, то согласно второму закону Ньютона можно записать:

$$Bev = \frac{mv^2}{r}$$

Кинетическую энергию, равную $\frac{mv^2}{2}$, электрон приобретает за счет работы A сил электрического поля ($A = eU$), поэтому имеем:

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

Преобразуя последние два соотношения и исключив из них скорость, получим формулу для определения удельного заряда электрона (1):

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2} \quad (1)$$

Подставив входные данные, находим:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot 3,52 \cdot 10^3 \text{ В}}{10^{-4} \text{ Тл}^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Ответ: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$.

4. Виток радиусом 2 см, по которому течет ток силой 10 А, свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией 1,5 Тл. Линии индукции перпендикулярны плоскости витка. Определить работу, совершаемую внешними силами при повороте витка на угол 90° вокруг оси, совпадающей с диаметром витка. Считать, что при повороте витка сила тока в нем поддерживается неизменной.

Дано: $I = 10 \text{ А}$, $B = 1,5 \text{ Тл}$, $r = 0,02 \text{ м}$, $\alpha = 90^\circ$.

Найти: A .

Решение. На виток с током, помещенный в магнитное поле, действует вращающий момент, определяемый формулой (1):

$$M = p_m B \sin \alpha \quad (1)$$

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

B – индукция магнитного поля;

α – угол между векторами p_m и $\vec{B}$.

В начальном положении, согласно условию задачи, виток свободно установился в магнитном поле, следовательно, векторы p_m и $\vec{B}$ совпадают по направлению, то есть $\alpha = 0$ и $M = 0$.

При действии внешних сил виток выходит из положения равновесия, при этом возникает момент сил, определяемый формулой (1). Момент сил стремится возвратить виток в исходное положение. При повороте витка внешние силы совершают работу против этого момента, который является переменным и зависит от угла поворота α :

$$dA = M \cdot d\alpha \text{ или } dA = I \cdot \pi \cdot r^2 \cdot B \cdot \sin \alpha d\alpha$$

Взяв интеграл от этого выражения, найдем работу, совершаемую при повороте витка на конечный угол:

$$A = \int_0^{\pi/2} I\pi r^2 B \sin \alpha d\alpha = I\pi r^2 B \int_0^{\pi/2} \sin \alpha d\alpha = I\pi r^2 B (-\cos \frac{\pi}{2} + \cos 0) = I\pi r^2 B$$

Подставляя числовые значения, находим:

$$A = 10 \text{ А} \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 1,5 \text{ Тл} = 18,84 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \approx 0,02 \text{ Дж}.$$

Ответ: $A = 0,02 \text{ Дж}$.

5. По соленоиду течет ток силой 5 А. Длина соленоиды 1 м, число витков 500. В соленоид вставлен железный сердечник. Найти намагниченность и объемную плотность энергии магнитного поля соленоиды. Зависимость $B = f(H)$ дана на рисунке 4.3.

Дано: $I = 5 \text{ А}$, $l = 1 \text{ м}$, $N = 500$.

Найти: I , ω .

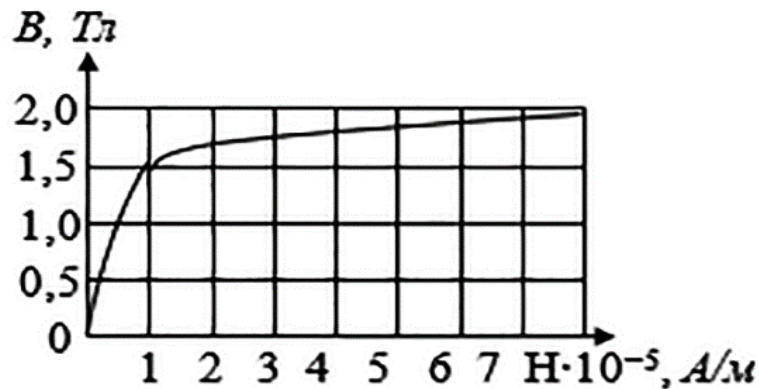


Рисунок 4.3

Решение. Намагниченность определяется отношением магнитного момента к объему магнетика и связана с напряженностью магнитного поля соотношением (1):

$$I = \chi \cdot H \quad (1)$$

где χ – магнитная восприимчивость среды.

Поле соленоида можно считать однородным. В этом случае напряженность поля вычисляется по формуле (2):

$$H = I \cdot n \quad (2)$$

где I – сила тока, текущего по обмотке соленоида;

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

Тогда получим выражение (3):

$$H = \frac{IN}{l} \quad (3)$$

Связь между магнитной восприимчивостью χ и магнитной проницаемостью μ среды выражается формулой (4):

$$\chi = \mu - 1 \quad (4)$$

Определим напряженность магнитного поля соленоида по формуле (3):

$$H = \frac{5 \text{ A} \cdot 500}{1 \text{ м}} = 2500 \frac{\text{A}}{\text{м}}$$

По графику на рисунке 4.3 находим, что напряженности $H = 2500$ А/м соответствует индукция магнитного поля $B = 1,6$ Тл. Используя соотношение (5):

$$B = \mu\mu_0 H \quad (5)$$

Получим:

$$\mu = \frac{1,6 \text{ Тл}}{12,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 2500 \text{ А/м}} = 500$$

Согласно формуле (4) имеем: $\chi = 500 - 1 = 499$. Определим намагничённость по формуле (1):

$$I = 499 \cdot 2500 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 124,75 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}} \approx 12,5 \cdot 10^5 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Объёмная плотность энергии магнитного поля соленоида составит:

$$\omega = \frac{BH}{2} = \frac{1,6 \text{ Тл} \cdot 2500 \text{ А/м}}{2} = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

Ответ: $I = 12,5 \cdot 10^5 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \omega = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

6. Материальная точка массой 10 г совершает гармонические колебания с периодом 1 с. Начальная фаза колебаний 30° . Определить амплитуду колебаний, максимальные скорость и ускорение колеблющейся точки, если максимальная кинетическая энергия равна 0,02 Дж.

Дано: $m = 0,01$ кг, $T = 1$ с, $\varphi_0 = 30^\circ = \frac{\pi}{6}$, $E_{k \max} = 0,002$ Дж.

Найти: A , $v_{\max}$, $a_{\max}$.

Решение. Полная энергия колеблющейся точки – это сумма потенциальной и кинетической энергии. Она равна максимальной кинетической или максимальной потенциальной энергии. Полная энергия зависит от массы колеблющейся точки, амплитуды и круговой частоты колебаний:

$$E = E_{k \max} = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

Отсюда находим:

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2E_{kmax}}{m}}$$

Или учитывая, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$:

$$A = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{2E_{kmax}}{m}}$$

$$A = \frac{1 \text{ с}}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{2 \cdot 0,02 \text{ Дж}}{0,01 \text{ кг}}} = 0,32 \text{ м}$$

Зная амплитуду, запишем уравнение гармонических колебаний, совершаемых материальной точкой (1):

$$x = 0,32 \sin(2\pi t + \frac{\pi}{6}) \quad (1)$$

где x – смещение точки относительно положения равновесия;

$0,32 \text{ м} = A$ – амплитуда;

$2\pi \text{ с}^{-1} = \omega$ – круговая частота;

$\frac{\pi}{6} = \varphi_0$ – начальная фаза колебаний.

Скорость точки определяется как первая производная от смещения по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = 0,32 \cdot 2\pi \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$$

Полагая, что $\cos(2\pi t + \frac{\pi}{6}) = 1$, получаем:

$$v_{\max} = 0,32 \text{ м} \cdot 2\pi \text{ с}^{-1} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ускорение точки определяется как первая производная от скорости по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = -0,32(2\pi)^2 \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$$

Полагая, что $\sin(2\pi t + \frac{\pi}{6}) = -1$, получаем:

$$a_{\max} = 0,32 \text{ м} \cdot 4\pi^2 \text{ с}^{-2} = 12,62 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Максимальную скорость можно найти из уравнения: $\frac{mv_{\max}^2}{2} = E_{k\max}$, откуда:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2E_{k\max}}{m}}$$
$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,02 \text{ Дж}}{0,01 \text{ кг}}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ответ: $A = 0,32 \text{ м}$, $v_{\max} = 2 \text{ м/с}$, $a_{\max} = 12,62 \text{ м/с}^2$.

7. Разность потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре изменяется со временем по закону $U = 100 \sin 1000 \pi t$. Емкость конденсатора $0,5 \text{ мкФ}$. Определить период собственных колебаний, индуктивность, энергию контура и максимальную силу тока, текущего по катушке индуктивности.

Дано: $U = 100 \sin 1000 \pi t$, $C = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

Найти: T , L , W , $I_{\max}$.

Решение. Напряжение на конденсаторе изменяется по гармоническому закону (1):

$$U = U_0 \sin \omega_0 t \quad (1)$$

где U_0 – амплитудное (максимальное) значение напряжения на обкладках конденсатора;

ω_0 – собственная циклическая частота колебаний, которая связана с периодом соотношением $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

Отсюда находим:

$$T = \frac{2\pi}{1000 \pi \text{ с}^{-1}} = 0,002 \text{ с}$$

Период собственных колебаний в контуре определяется по формуле Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$, откуда:

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}$$
$$L = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 0,2 \text{ Гн}$$

Энергия контура – это сумма электрической $W_{\text{э}} = \frac{CU^2}{2}$ и магнитной $W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$ энергий.

Она равна максимальной энергии поля конденсатора $W_{\text{эmax}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2}$ или максимальной энергии катушки индуктивности $W_{\text{мmax}} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}$:

$$W = \frac{0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 100^2 \text{ В}}{2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 2,5 \text{ мДж}$$

Зная полную энергию, можно определить максимальную силу тока, протекающего по катушке индуктивности:

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2W}{L}}$$
$$I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}}{0,2 \text{ Гн}}} = 0,15 \text{ А}$$

Ответ: $T = 0,002 \text{ с}$, $L = 0,2 \text{ Гн}$, $W = 2,5 \text{ мДж}$, $I_{\text{max}} = 0,15 \text{ А}$.

8. Колеблющиеся точки удалены от источника колебаний на расстояния 0,5 и 1,77 м в направлении распространения волны. Разность фаз их колебаний равна $\frac{3\pi}{4}$. Частота колебаний источника 100 с^{-1} . Определить длину волны и скорость ее распространения. Написать уравнение волны для заданных точек, если амплитуды их колебаний равны 1 см.

Дано: $l_1 = 0,5 \text{ м}$, $l_2 = 1,77 \text{ м}$, $\Delta\varphi = \frac{3\pi}{4}$, $\nu = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, $A_1 = A_2 = A = 0,01 \text{ м}$.

Найти: λ , v .

Решение. Из уравнения бегущей волны по разности фаз $\Delta\varphi$ и расстоянию l от источника колебаний до колеблющейся точки, можно определить λ .
Имеем:

$$x = A \sin \omega \left(t - \frac{l}{v} \right), \quad (1)$$

$$\text{или } x = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right) \quad (2)$$

где x – смещение колеблющейся точки;

t – время колебания;

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = 200\pi$ – круговая частота.

В уравнении (2) выражение $2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right)$ является фазой колебаний. Запишем фазы для каждой из заданных точек:

$$\varphi_1 = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_1}{\lambda} \right), \quad (3)$$

$$\varphi_2 = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_2}{\lambda} \right) \quad (4)$$

Тогда разность фаз составит:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda}$$

Откуда:

$$\lambda = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\Delta\varphi}$$

$$\lambda = \frac{2\pi(1,77 - 0,5) \text{ м}}{3\pi/4} = 3,38 \text{ м}$$

Скорость распространения волны составит:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$$

$$v = 3,38 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 338 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Подставляя числовые значения в уравнение (1), получаем соответственно

для первой и второй точек:

$$x_1 = 0,01 \sin 200\pi(t - \frac{0,5}{338})$$

$$x_2 = 0,01 \sin 200\pi(t - \frac{1,77}{338})$$

Ответ: $\lambda = 3,38$ м, $v = 338$ м/с.

9. Определить энергию, переносимую плоской синусоидальной электромагнитной волной, распространяющейся в вакууме, за 1 с сквозь поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Амплитуда напряженности электрического поля волны 5 мВ/м. Период волны $T \ll t$.

Дано: $E_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ В/м, $T \ll t$, $S = 1$ м², $t = 1$ с.

Найти: W .

Решение. Плотность потока энергии (или интенсивность излучения) электромагнитных волн, то есть количество энергии, переносимой за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны, определяется вектором: $\vec{P} = \vec{E} \cdot \vec{H}$, где $\vec{E}$, $\vec{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. Учитывая, что $\vec{E} \perp \vec{H}$, получим для модуля вектора $\vec{P}$: $P = E \cdot H$.

Так как величины E и H в каждой точке электромагнитной волны меняются во времени по закону синуса, находясь в одинаковых фазах, то мгновенное значение величины P составит:

$$P = E_0 \sin \omega t \cdot H_0 \sin \omega t = E_0 H_0 \sin^2 \omega t \quad (1)$$

Таким образом, величина 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) получаем выражение (3):

$$dW = PSdt = E_0 H_0 \sin^2 \omega t dt \cdot S \quad (3)$$

Для определения dW необходимо знать величину H_0 , которая может быть найдена из соотношения: $\frac{\varepsilon \varepsilon_0 E_0^2}{2} = \frac{\mu \mu_0 H_0^2}{2}$. Отсюда: $H_0 = E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}}$.

По условию, $\varepsilon = \mu = 1$, тогда:

$$H_0 = E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в выражение (3), получим:

$$dW = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 S \sin^2 \omega t dt$$

Энергия, переносимая волной за время t , составит:

$$W = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 S \int_0^t \sin^2 \omega t dt = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 S \left(\frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right)$$

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:

$$W = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 S \left(\frac{t}{2} \right)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}}{12,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}} 0,25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2} 1 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ с} = 3,25 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$$

Ответ: $W = 3,25 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$.

5 ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1 Основные законы и формулы

Показатель преломления среды
(абсолютный)

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

Оптическая длина пути луча

$$L = nl$$

Оптическая разность хода двух
световых волн

$$\Delta = L_1 - L_2$$

Условие максимума интенсивности
света при интерференции

$$\Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$$

где $k = 0, 1, 2 \dots$

Условие минимума интенсивности света
при интерференции

$$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$

Линейное угловое расстояние между
соседними интерференционными
полосами на экране, расположенном
параллельно двум когерентным
источникам света

$$\Delta l = \frac{L\lambda}{d} ; \Delta \alpha = \frac{\lambda}{d}$$

Оптическая разность хода световых
волн в тонких пленках

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

Оптическая разность хода световых
волн в отраженном и проходящем свете

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}$$

Радиус темных колец Ньютона
в отраженном свете

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}$$

Радиус светлых колец Ньютона
в отраженном свете

$$r_k = \sqrt{(2k - 1) \frac{R\lambda}{2}}$$

Условие дифракционных максимумов
от одной щели

$$a \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Условие главных максимумов
дифракционной решетки

$$c \sin \varphi = k\lambda$$

Формула Вульфа-Брэгга для
дифракционных рентгеновских лучей

$$2d \sin \theta = k\lambda$$

Разрешающая сила дифракционной
решетки

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

Формулы Френеля для отраженного
естественного света от диэлектриков

$$I_{\perp} = 0,5I_0 \left[\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \right]^2$$

$$I_{\parallel} = 0,5I_0 \left[\frac{\operatorname{tg}(i - r)}{\operatorname{tg}(i + r)} \right]^2$$

Степень поляризации света

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \cdot 100\%$$

Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_0 = n_{21} = n_2/n_1$$

Закон Малюса

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

Разность хода лучей, прошедших
пластинку испанского шпата (или
кварца), вырезанную параллельно
оптической оси, в случае нормального
падения света

$$\Delta = d(n_0 - n_e)$$

Угол поворота плоскости поляризации
монохроматического света при
прохождении через оптически активное
вещество: кристаллы

$$\varphi = \varphi_0 l$$

Угол поворота плоскости поляризации
монохроматического света при
прохождении через оптически активное
вещество: растворы

$$\varphi = [\varphi_0]lc$$

Связь между групповой (u)
и фазовой (v) скоростями волн

$$u = v \left(1 + \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

Условие возникновения излучения
Вавилова-Черенкова

$$v > c/n$$

Закон Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma T^4$$

Закон смещения Вина

$$\lambda_{max} = b_1/T$$

Связь между энергетической
светимостью и энергетической
яркостью для абсолютно черного тела

$$B_e = R_e/\pi$$

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$$

Масса фотона

$$m_\phi = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

Импульс фотона

$$p_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Давление света при нормальном
падении на поверхность
с коэффициентом отражения

$$p = \omega(1 + \rho); \quad p = \frac{E_e(1 + \rho)}{c}$$

Закон Бугера

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего
фотоэффекта: при $T < 5$ кэВ

$$T = \frac{1}{2} m v^2$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего
фотоэффекта: при $T > 5$ кэВ

$$T = E - E_0 = m_0 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_{гр} = A/h$$

или $\lambda_{гр} = hc/A$

Изменение длины волны при эффекте
Комптона

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) =$$

$$= \Lambda(1 - \cos \theta) = 2\Lambda \sin^2(\theta/2)$$

5.2 Примеры решения задач

1. Расстояние между двумя когерентными источниками $d = 0,9$ мм. Источники, испускающие монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 640$ нм, расположены на расстоянии $L = 3,5$ м от экрана. Определить число светлых полос, располагающихся на 1 см длины экрана.

Дано: $d = 9 \cdot 10^{-4}$ м, $\lambda = 640$ нм = $64 \cdot 10^{-4}$ м, $L = 3,5$ м, $x = 1 \cdot 10^{-2}$ м.

Найти: $\frac{k}{x}$.

Решение. В точке O на экране (рис. 5.1) будет максимальная освещенность: точка O равноудалена от обоих источников S'_1 и S'_2 и, поэтому, разность хода волн S'_1O и S'_2O равна нулю.

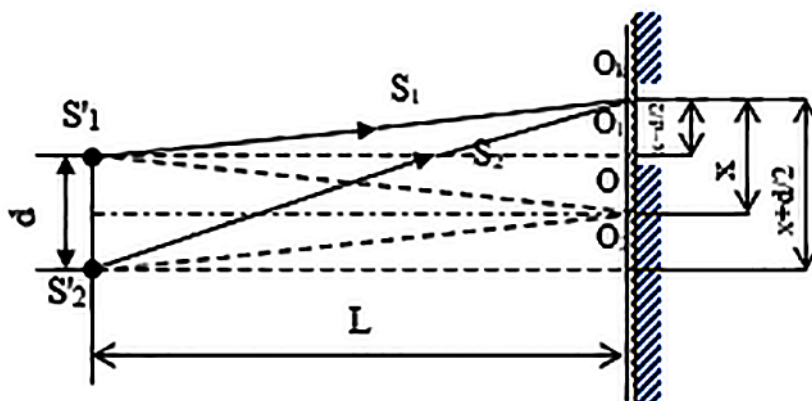


Рисунок 5.1

В произвольной точке экрана O_k максимум освещенности будет наблюдаться, если оптическая разность хода когерентных волн равна целому числу длин волн:

$$\Delta = s_2 - s_1 = k\lambda \quad (1)$$

где s_2, s_1 – оптические пути интерферирующих волн;

λ – длина волны падающего света;

k – номер светлой полосы (центральная светлая полоса принята за нулевую).

Оптическая разность хода волн $\Delta = \frac{x d}{L}$, где x – расстояние от центральной

светлой до k -й светлой полосы. Учитывая выражение (1), получим:

$$\Delta = \frac{xd}{L} = k\lambda \quad (2)$$

Из выражения (2) определяем искомую величину $\frac{k}{x}$ – число светлых интерференционных полос на 1 см длины:

$$\frac{k}{x} = \frac{d}{L\lambda}$$

Подставляя в это выражение числовые значения, получим:

$$\frac{k}{x} = \frac{9 \cdot 10^{-4} \text{ м}}{3,5 \text{ м} \cdot 64 \cdot 10^{-8} \text{ м}} = 400 \text{ м}^{-1}$$

Ответ: $\frac{k}{x} = 400 \text{ м}^{-1}$.

2. В просветленной оптике для устранения отражения света на поверхность линзы наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления 1,26, меньшим, чем у стекла. При какой толщине пленки отражение света от линзы не будет наблюдаться? Длина волны падающего света – 0,55 мкм, угол падения – 30° .

Дано: $\lambda = 0,55 \text{ мкм} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $i = 30^\circ$, $n = 1,26$.

Найти: d .

Решение. Свет, падая на систему «пленка – стекло» под углом i , отражается как от верхней I, так и от нижней II поверхности пленки (рис. 5.2).

$n_1 < n < n_2$, n_1 и n_2 – показатели преломления соответственно воздуха и стекла. Лучи S_1 и S_2 когерентны, так как образованы из одного луча S . Результат интерференции этих лучей зависит от оптической разности хода. Лучи отражаются от среды с большим показателем преломления, поэтому как на верхней, так и на нижней поверхности пленки происходит потеря полуволны и, следовательно, оптическая разность хода волн равна:

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

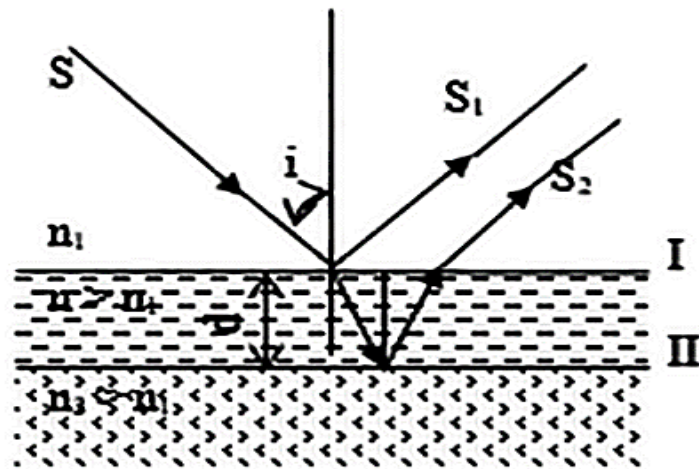


Рисунок 5.2

Условие минимума освещенности при интерференции (условие минимумов) имеет вид выражения (2):

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ – порядок интерференционного минимума.

Из выражений (1) и (2) следует:

$$2d_k \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Откуда:

$$d_k = \frac{(2k + 1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$$

Полагая, что $k = 1, 2, 3, \dots$, получим ряд возможных значений толщины пленки:

$$d_1 = \frac{3\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$$

$$d_2 = \frac{5\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$$

$$d_1 = \frac{3 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{4 \sqrt{1,26^2 - \sin^2 30^\circ}} = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,35 \text{ мкм}$$

$$d_2 = \frac{5 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{4 \sqrt{1,26^2 - \sin^2 30^\circ}} = 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,59 \text{ мкм}$$

Ответ: $d_1 = 0,35 \text{ мкм}$; $d_2 = 0,59 \text{ мкм}$ и т. д.

3. На дифракционную решетку D нормально падает монохроматический свет с длиной волны $0,65 \text{ мкм}$. На экране $\mathcal{E}$, расположенном параллельно решетке и отстоящем от нее на расстоянии $0,5 \text{ м}$, наблюдается дифракционная картина (рис. 5.3). Расстояние между дифракционными максимумами первого порядка равно 10 см . Определить постоянную дифракционной решетки и общее число главных максимумов, полученных с помощью этой решетки.

Дано: $\lambda = 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $L = 0,5 \text{ м}$, $l = 0,1 \text{ м}$, $k = 1$.

Найти: c , n .

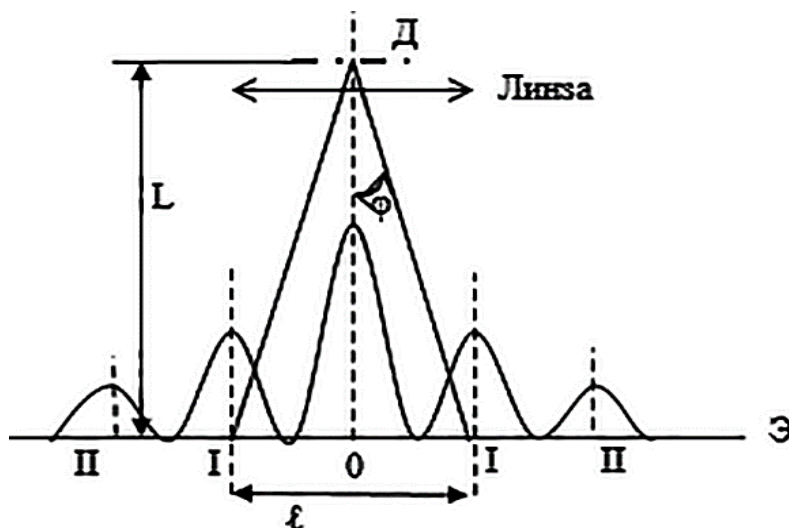


Рисунок 5.3

Решение. Запишем условие главных максимумов дифракционной решетки (1):

$$c \cdot \sin \varphi = k\lambda \quad (1)$$

где c – постоянная дифракционной решетки;

φ – угол отклонения лучей от нормального направления распространения света;

k – порядок главного дифракционного максимума;

λ – длина волны падающего на решетку монохроматического света.

По условию задачи, $k = 1$. Учитывая, что $\frac{l}{2} \ll L$ (рис. 5.3), имеем:

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{2 \cdot L} \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в выражение (1), получим:

$$\frac{c \cdot l}{2 \cdot L} = \lambda \text{ или } c = \frac{2 \cdot \lambda \cdot L}{l} \quad (3)$$

Подставляя в выражение (3) числовые значения величин, находим:

$$c = \frac{2 \cdot 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м}}{0,1 \text{ м}} = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 6,5 \text{ мкм}$$

Для определения общего числа главных максимумов, даваемых дифракционной решеткой, исходим, из условия, что максимальный угол отклонения лучей от нормального направления распространения не может превышать 90° , то есть $\sin 90^\circ = 1$. Тогда формула (1) примет вид $k_{\max} = \frac{c}{\lambda}$. Производим вычисления:

$$k_{\max} = \frac{6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 10$$

Общее число максимумов равно $n = 2k_{\max} + 1$, то есть влево и вправо от центрального максимума будут наблюдаться по $k_{\max}$ максимумов:

$$n = 2 \cdot 10 + 1 = 21$$

Ответ: $c = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $n = 21$.

4. Определить расстояние между атомными плоскостями в кристалле каменной соли, если дифракционный максимум первого порядка наблюдается при падении рентгеновских лучей с длиной волны $0,147 \text{ нм}$ под углом $15^\circ 12'$ к поверхности кристалла.

Дано: $\lambda = 0,147 \text{ нм} = 1,47 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $\theta = 15^\circ 12'$, $k = 1$.

Найти: d .

Решение. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах – это результат интерференции рентгеновского излучения, зеркально отражающегося от системы параллельных плоскостей, которые проходят через узлы-атомы (например, А) кристаллической решетки. Эти плоскости называют атомными (рис. 5.4).

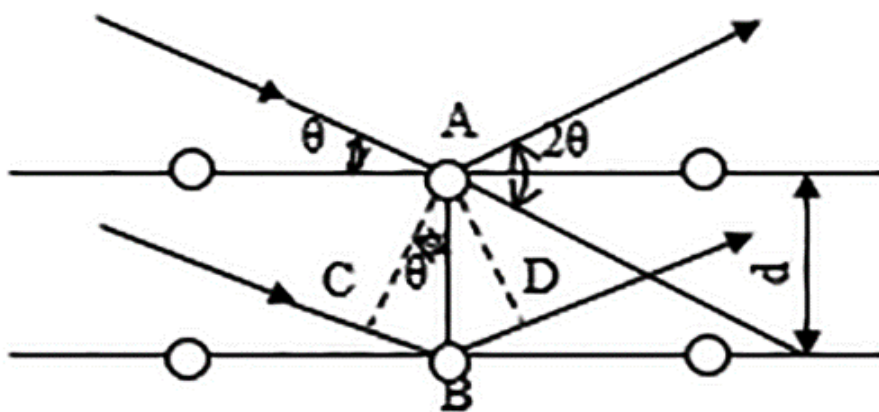


Рисунок 5.4

Отражение наблюдается лишь в тех направлениях, соответствующих дифракционным максимумам, которым удовлетворяет соотношение (1):

$$\Delta = |BC| + |BD| = 2d \sin \theta \text{ или } 2d \sin \theta = k\lambda \quad (1)$$

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

θ – угол скольжения, то есть угол между падающим лучом и плоскостью кристалла;

d – расстояние между соседними плоскостями, называемое межплоскостным.

Исходя из условия (1) и учитывая, что $k = 1$, имеем:

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta} = \frac{1,47 \cdot 10^{-10} \text{ м}}{2 \cdot \sin 15^\circ 12'} = 2,82 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,282 \text{ нм}$$

Ответ: $d = 0,282 \text{ нм}$.

5. Луч света, проходя слой льда, падает на алмазную пластинку, частично отражается, частично преломляется. Определить, каким должен быть угол падения, чтобы отраженный луч был максимально поляризован. Найти степень поляризации отраженного и преломленного света для этого угла падения с помощью формул Френеля.

Дано: $n_1 = 1,31$, $n_2 = 2,42$.

Найти: i_0 , P_1 , P_2 .

Решение. Отраженный свет максимально поляризован при угле падения $i = i^0$, удовлетворяющем закону Брюстера (1):

$$\operatorname{tg} i_0 = n_{21} \quad (1)$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления отражающей среды.

Если $i = i_0$, то отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. Проходящий свет поляризован лишь частично. Из выражения (1) находим:

$$i_0 = \operatorname{arctg} \frac{n_2}{n_1} = \operatorname{arctg} \frac{2,42}{1,31} = 61,5^\circ$$

С помощью формул Френеля определяем степень поляризации отраженного луча:

$$P_1 = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$I_{\perp} = 0,5 \cdot I_0 \left[\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \right]^2, \quad (3)$$

$$I_{\parallel} = 0,5 \cdot I_0 \left[\frac{\operatorname{tg}(i - r)}{\operatorname{tg}(i + r)} \right]^2 \quad (4)$$

где $I_{\perp}$ и $I_{\parallel}$ – интенсивности света, распространяющегося в направлениях, перпендикулярном и параллельном плоскости падения;

I_0 – интенсивность естественного света;

i – угол падения;

r – угол преломления.

Если свет падает на диэлектрик под углом полной поляризации ($i = i_0$), то, учитывая, что $i_0 + r = 90^\circ$, для отраженного луча из выражения (3) получим:

$$I_{\perp} = 0,5 \cdot I_0 \cdot \sin^2(i_0 - r), \quad I_{\parallel} = 0$$

$$\text{так как } \sin(i_0 + r) = \sin 90^\circ = 1, \quad \operatorname{tg} 90^\circ \rightarrow \infty$$

Степень поляризации отраженного луча равна:

$$P_1 = \frac{I_{\perp}}{I_{\perp}} \cdot 100\% = 100\%$$

То есть луч максимально поляризован.

Найдем интенсивности света после преломления в направлениях, перпендикулярном и параллельном плоскости преломления:

$$I'_{\perp} = 0,5I_0 - I_{\perp} = 0,5I_0 - 0,5I_0 \cdot \sin^2(i - r) = 0,5I_0[1 - \sin^2(i_0 - r)]; \quad I'_{\parallel} = 0,5I_0$$

Степень поляризации преломленного луча составит:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{I'_{\parallel} - I'_{\perp}}{I'_{\parallel} + I'_{\perp}} \cdot 100\% = \frac{0,5I_0 - 0,5I_0[1 - \sin^2(i_0 - r)]}{0,5I_0 + 0,5I_0[1 - \sin^2(i_0 - r)]} \cdot 100\% = \\ &= \frac{\sin^2(i_0 - r)}{2 - \sin^2(i_0 - r)} \cdot 100\% \end{aligned}$$

$$P_2 = \frac{\sin^2(61^\circ,5 - 28^\circ,5)}{2 - \sin^2(61^\circ,5 - 28^\circ,5)} \cdot 100\% = \frac{0,54^2}{2 - 0,54^2} \cdot 100\% = 17\%$$

Ответ: $i_0 = 61^\circ 5$, $P_1 = 100\%$, $P_2 = 17\%$.

6. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, плоскости поляризации которых составляют угол 45° . Каждый николь поглощает 8 % света, падающего на него (рис. 5.5.).

Дано: $\alpha = 45^\circ$, $k = 0,08$.

Найти: $\frac{I_0}{I_2}$.

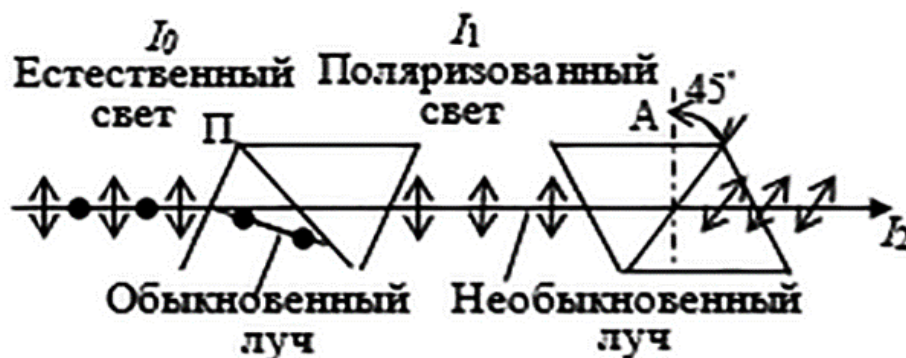


Рисунок 5.5

Решение. В результате двойного лучепреломления естественный луч света, попадая в призму Π -поляризатор, раздваивается на обыкновенный и необыкновенный лучи. Оба луча поляризованы, но во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обыкновенный луч, подчиняясь закону преломления, преломится и, подойдя к слою канадского бальзама в николе, испытает полное отражение и поглотится зачерненной боковой гранью призмы. Необыкновенный луч проходит через призму без отклонения, интенсивность его уменьшается из-за поглощения света призмой на величину $k \cdot I_0$.

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, равна:

$$I_1 = 0,5(1 - k)I_0 \quad (1)$$

где $k = 0,08$ (8 %) – коэффициент поглощения света в призме;

I_0 – интенсивность естественного света, падающего на поляризатор.

Поляризованный свет, войдя во второй николю анализатор A , опять поглощается, и интенсивность его уменьшается на величину $k \cdot I_0$; кроме того, интенсивность поляризованного света из-за несовпадения плоскостей поляризации поляризатора и анализатора, согласно закону Малюса, равна:

$$I_2 = I_1(1 - k)\cos^2 \alpha \quad (2)$$

где α – угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора;

k – коэффициент поглощения;

I_1 – интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор;

I_2 – интенсивность поляризованного света, прошедшего через анализатор.

Подставляя выражение (1) в выражение (2), получим:

$$I_2 = 0,5(1 - k)^2 \cdot I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует:

$$\frac{I_2}{I_0} = 0,5(1 - k)^2 \cdot \cos^2 \alpha$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{0,5(1 - k)^2 \cdot \cos^2 \alpha}$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\frac{I_2}{I_0} = 0,5(1 - 0,08)^2 \cos^2 45^\circ = 0,2$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{0,2} = 5$$

Ответ: $\frac{I_0}{I_2} = 5$.

7. Показатель преломления сероуглерода для света с длинами волн 509, 534 и 589 нм равен соответственно 1,647; 1,640 и 1,630. Вычислить фазовую и групповую скорости света вблизи длины волны 534 нм.

Решение. Групповая скорость u связана с фазовой скоростью v света в среде соотношением (1):

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} \quad (1)$$

Учитывая, что $v = \frac{c}{n}$, из выражения (1) получаем:

$$u = v \left[1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right]$$

Для средней дисперсии вещества имеем:

$$u = v \left[1 + \frac{\lambda \Delta n}{n \Delta \lambda} \right] \quad (2)$$

где $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$ – средняя дисперсия показателя преломления среды.

Для $\lambda = 534$ нм и $n = 1,640$ находим относительную дисперсию:

$$\frac{\lambda \Delta n}{n \Delta \lambda} = \frac{535 \text{ нм} \cdot (1,647 - 1,630)}{1,640 \cdot (509 - 589) \text{ нм}} = -0,069$$

Из соотношения (2) определяем:

$$\frac{u}{v} = \left[1 + \frac{\lambda \Delta n}{n \Delta \lambda} \right] = (1 - 0,069) = 0,931$$

$$u = 0,931v$$

Учитывая, что фазовая скорость $v = \frac{c}{n}$, находим ее значение вблизи $\lambda = 534$ нм:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,640} = 1,83 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Зная, что $u = 0,931v$, вычисляем групповую скорость:

$$u = 0,931 \cdot 1,83 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 1,70 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Ответ: $v = 1,83 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $u = 1,70^8 \text{ м/с}$.

8. В черенковском счетчике из каменной соли релятивистские протоны излучают в фиолетовом участке спектра в конусе с раствором $98^\circ,80$. Определить кинетическую энергию протонов. Длина волны фиолетовых лучей $0,4$ мкм. Коэффициент преломления для этого участка спектра $1,54$.

Дано: $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\theta = 49^\circ,40$, $n = 1,54$, $E_0 = 938,23 \text{ МэВ}$.

Найти: E_k .

Решение. Если частица движется в веществе со «сверхсветовой» скоростью V , то возникает свечение Вавилова-Черенкова при условии (1):

$$V > v = \frac{c}{n} \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме;

n – показатель преломления вещества;

v – фазовая скорость света.

Свет, возникающий на каждом, малом участке траектории заряженной частицы, распространяется вдоль образующих конуса, вершина которого O (рис. 5.6), расположена на этом участке; ось совпадает с траекторией частицы, а образующие составляют с осью угол:

$$\theta = \arccos\left(\frac{c}{nV}\right) \quad (2)$$

$$\cos \theta = \frac{c}{nV} \quad (3)$$

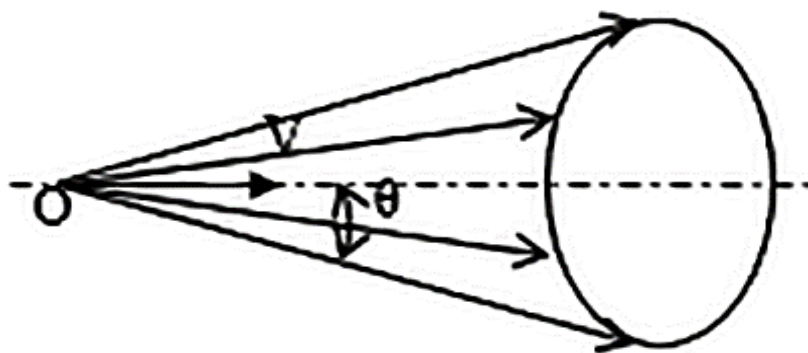


Рисунок 5.6

Так как излучаются релятивистские протоны, то их кинетическая энергия равна:

$$E_k = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} - 1 \right) \quad (4)$$

Величину $\frac{V}{c}$ определим из соотношения (3):

$$\frac{V}{c} = \frac{1}{n \cos \theta} = \frac{1}{1,54 \cdot \cos 49^\circ 40'} = \frac{1}{1,54 \cdot 0,6507} = 0,998$$

Используя формулу (4), находим кинетическую энергию:

$$E_k = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,998^2}} - 1 \right) 938,23 \text{ МэВ} \approx 14 \text{ ГэВ}$$

Ответ: $E_k = 14 \text{ ГэВ}$.

9. Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения передвинется от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе?

Дано: $\lambda_k = 0,76 \text{ мкм}$; $\lambda_\phi = 0,38 \text{ мкм}$.

Найти: $n = \frac{N_\phi}{N_k}$.

Решение. Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, определяется из первого закона смещения Вина (1):

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T} \quad (1)$$

где T – термодинамическая температура излучателя;

$b_1 = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

По формуле (1) определяем температуру, соответствующую красной и фиолетовой границам видимой области спектра:

$$T_k = \frac{b_1}{\lambda_k}; \quad T_\phi = \frac{b_1}{\lambda_\phi}$$

Мощность излучения абсолютно черного тела $N = R_e \cdot S$, где R_e – энергетическая светимость абсолютно черного тела; S – площадь поверхности излучающего тела.

В соответствии с законом Стефана-Больцмана (2):

$$R_e = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для красной и фиолетовой границ видимой области спектра:

$$N_k = \sigma \cdot T_k^4; \quad N_\phi = \sigma \cdot T_\phi^4$$

Из формул (1) и (2) следует:

$$\frac{N_{\phi}}{N_{\kappa}} = \frac{\sigma S(b_1/\lambda_{\phi})^4}{\sigma S(b_1/\lambda_{\kappa})^4} = \frac{(b_1/\lambda_{\phi})^4}{(b_1/\lambda_{\kappa})^4}, \text{ то есть } \frac{N_{\phi}}{N_{\kappa}} = \left(\frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_{\phi}}\right)^4$$

Отношение $\frac{N_{\phi}}{N_{\kappa}} = n$ показывает, во сколько раз увеличивается мощность излучения абсолютно черного тела:

$$n = \left(\frac{0,76 \text{ мкм}}{0,38 \text{ мкм}}\right)^4 = 2^4 = 16$$

Ответ: мощность излучения увеличится в 16 раз.

10. На зачерненную поверхность нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,65 мкм, производя давление $0,5 \cdot 10^{-5}$ Па. Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности и число фотонов, падающих на площадь 1 м^2 за одну секунду.

Дано: $\lambda = 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $p = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, $\rho = 0$, $S = 1 \text{ м}^2$, $t = 1 \text{ с}$.

Найти: n_0 , n .

Решение. Давление света при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения ρ вычисляется по формулам (1), (2):

$$p = \omega \cdot (1 + \rho) \quad (1)$$

$$\text{или } p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) \quad (2)$$

где ω – объемная плотность энергии;

E_e – энергетическая освещенность;

c – скорость света в вакууме;

ρ – коэффициент отражения поверхности, в данном случае $\rho = 0$.

Объемная плотность энергии равна произведению концентрации фотонов (числа фотонов в единице объема) на энергию одного фотона $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, то есть:

$$\omega = n_0 \cdot \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

$$\text{откуда } n_0 = \frac{\omega\lambda}{hc} \quad (4)$$

Определяя объемную плотность энергии из выражения (1) и подставляя в выражение (4), получим:

$$n_0 = \frac{p\lambda}{hc} \quad (5)$$

Тогда:

$$n_0 = \frac{0,5 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{6,62 \cdot 10^{-32} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$$

Число фотонов, падающих на площадь 1 м² за 1 с, численно равно отношению энергетической освещенности к энергии одного фотона:

$$n = \frac{E_e}{hc/\lambda} = \frac{E_e\lambda}{hc} \quad (6)$$

Энергетическую освещенность определяем из выражения (2) и, подставляя в выражение (6), получаем:

$$n = \frac{pc\lambda}{hc} = \frac{p\lambda}{h} \quad (6)$$

С учетом выражения (5), выражение (7) примет вид $n = n_0 c$. Подставляя числовые значения, получаем:

$$n = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 4,8 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$$

Ответ: $n_0 = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$, $n = 4,8 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

11. Угол рассеяния фотона с энергией 1,2 МэВ на свободном электроном 60° . Найти длину волны рассеянного фотона; энергию и импульс электрона отдачи. Кинетической энергией электрона до соударения пренебречь.

Дано: $\varepsilon = 1,2 \text{ МэВ} = 1,92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$, $\theta = 60^\circ$.

Найти: λ_2 , T_e , p_e .

Решение. Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии равно:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = \Lambda (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн падающего и рассеянного фотонов;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка;

$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме;

$\Lambda = 2,34 \cdot 10^{-12}$ м – комптоновская длина волны;

θ – угол рассеивания (рис. 5.7).

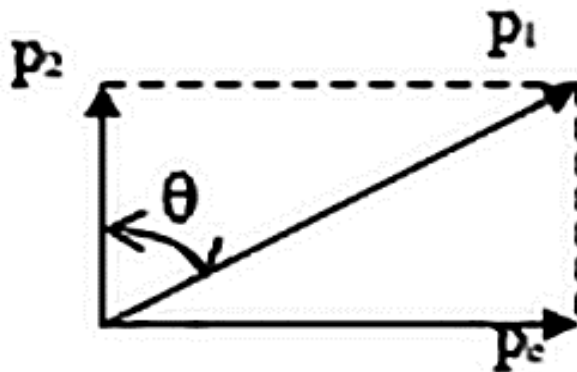


Рисунок 5.7

На рисунке 5.7, p_1 и p_2 – импульсы падающего и рассеянного фотонов.

Из формулы (1) находим $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda = \lambda_1 + \Lambda (1 - \cos \theta)$. Выражая λ_1 через энергию фотона $\varepsilon_1 = \frac{hc}{\lambda_1}$, получаем:

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\varepsilon_1} + \Lambda (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

Энергия отдачи электрона по закону сохранения энергии равна:

$$T_e = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Выразим изменение длины волны через изменение частоты:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{\nu_2} - \frac{c}{\nu_1} = \frac{c(\nu_1 - \nu_2)}{\nu_1 \nu_2}$$

С учетом выражения (1) можно записать:

$$v_1 - v_2 = \frac{hv_1 v_2}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

Умножая выражение (3) на h , а также учитывая, что:

$$hv_1 = \varepsilon_1; hv_2 = \varepsilon_2; m_0 c^2 = E_0; \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = T_e$$

Получаем выражение (4):

$$T_e = \frac{\varepsilon_1^2 (1 - \cos \theta)}{E_0 + \varepsilon_1 (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

где $E_0 = 0,511 \text{ МэВ} = 0,82 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ – энергия покоя электрона.

Зная энергию электрона, найдем:

$$p_e = \frac{1}{c} \sqrt{T_e (T_e + 2E_0)} \quad (5)$$

Подставляя числовые значения в формулы (2), (4) и (5), получаем:

$$\lambda_2 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} + 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} (1 - 0,5) = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

$$T_e = \frac{(1,2 \text{ МэВ})^2 \cdot 0,5}{0,511 \text{ МэВ} + 1,2 \text{ МэВ} \cdot 0,5} = 0,648 \text{ МэВ} = 1,04 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

$$p_e = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \sqrt{1,04 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} (1,04 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 0,82 \cdot 10^{-13}) \text{ Дж}} = 5,55 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

Ответ: $\lambda_2 = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ м}$; $T_e = 0,648 \text{ МэВ}$; $p_e = 5,55 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Движение точки описывается уравнением: $s = 2t^3 - 10t^2 + 8$. Найдите скорость и ускорение точек в момент $t = 4$ с. Постройте график скорости и ускорения.

2. Уравнение вращения твердого тела: $\varphi = 3t^2 + t$. Определите число оборотов твердого тела, угловую скорость и ускорение через 10 секунд после начала вращения.

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

4. Диск, вращаясь вокруг оси, проходящей через его середину, совершает 180 об/мин. Определите 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 м/с.

5. Снаряд массой 20 кг, летевший 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 м/с?

6. Частица массой $6,5 \cdot 10^{-27}$ кг упруго соударяется с частицей массой $1,1 \cdot 10^{-23}$ кг, находящейся в покое. После удара первая частица движется в направлении, противоположном первоначальному. На сколько изменилась энергия первой частицы?

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

8. Маховик и легкий шкив насажены на горизонтальную ось. К шкиву с помощью нити привязан груз, который, опускаясь равноускоренно, прошел

путь – 2 метра за 4 секунды. Момент инерции маховика $0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Определите массу груза, если радиус шкива 6 см; его массой можно 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 3 000 км над ее поверхностью?

10. Определите период обращения искусственного спутника Земли, если известно, что он вращается по круговой орбите радиусом 7 800 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 равны соответственно 16 и 12 см; начальные фазы 30° и 90° ; частота колебаний одинакова. Найдите 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. Какое количество воздуха было израсходовано, 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 стенки сосуда 1 кПа?

14. Сколько столкновений происходит между молекулами воздуха за одну секунду в 1 см^3 при температуре 7°C , если плотность воздуха $0,05 \text{ кг/м}^3$?

15. Вычислите коэффициент диффузии воздуха при давлении 10^5 Па и температуре 17°C .

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

17. Определите полную энергию молекул кислорода, находящихся при

температуре $47\text{ }^{\circ}\text{C}$, если его масса 64 кг . Какова энергия молекул кислорода, приходящаяся на вращательное движение?

18. Азот массой 2 кг при температуре $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 10^5 Па сжимают до давления 10^6 Па . Определите работу, затраченную на сжатие, если газ сжимают: 1) изотермически; 2) адиабатно.

19. При изобарном расширении 1 кг воздуха его объем увеличился на 100 л . Найдите температуру и работу при расширении, если начальное давление 10^5 Па , а начальная температура $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

20. Определите 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 10 раз. Каково изменение энтропии?

22. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя $127\text{ }^{\circ}\text{C}$, холодильника $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. На сколько надо изменить температуру нагревателя (при неизменной температуре холодильника), чтобы увеличить КПД машины в два раза?

23. Азот массой 14 кг занимает объем $0,5\text{ м}^3$ при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса, найдите, на сколько нужно изменить температуру газа, чтобы давление увеличилось вдвое?

24. В сообщающихся капиллярных трубках с диаметрами 1 и $1,5\text{ мм}$ разность уровней ртути 5 мм . Определите поверхностное натяжение ртути.

25. Во сколько раз сила электрического взаимодействия двух электронов больше их гравитационного взаимодействия?

26. Два проводящих шарика массой по 4 г каждый подвешены в воздухе на непроводящих нитях длиной 205 см к одному крючку. Шарикам сообщили равные одноименные заряды, вследствие чего шарики разошлись на расстояние 90 см . Определите заряд шарика.

27. Электрон движется вокруг ядра водорода по круговой орбите радиусом $5,29 \cdot 10^{-9}$ см. Определите скорость электрона на этой орбите.

28. Определите потенциал поля, образованного диполем, в точках плоскости, перпендикулярной его оси и проходящей через середину отрезка, соединяющего заряды диполя.

29. В центре куба помещен заряд 10,6 нКл. Определите число силовых линий, проходящих через грань куба.

30. Обкладки плоского конденсатора помещены в керосин. Какую работу необходимо совершить, чтобы раздвинуть обкладки конденсатора на расстояние от 2 до 11 см, если они заряжены до напряжения 600 В и отключены от источника? Площадь каждой обкладки 628 см^2 .

31. В центре квадрата расположен положительный заряд 0,25 мкКл. Какой заряд нужно поместить в каждой вершине квадрата, чтобы система зарядов находилась в равновесии? Что можно сказать о знаке зарядов?

32. Между плоскими горизонтальными пластинками, заряженными равномерно, помещена пылинка массой 10^{-16} кг с зарядом $4,8 \cdot 10^{-19}$ Кл. Какова плотность зарядов на пластинах, если пылинка находится в равновесии?

33. Площадь каждой обкладки плоского воздушного конденсатора 314 см^2 , расстояние между ними 2 мм. Напряженность поля между обкладками 60 кВ/м. Какую работу нужно затратить, чтобы поместить между обкладками конденсатора стеклянную пластинку, если она полностью заполняет конденсатор и конденсатор после зарядки отключен от источника напряжения?

34. Расстояние между обкладками плоского конденсатора равно 8 мм, площадь обкладок $62,8 \text{ см}^2$. Какую работу нужно затратить, чтобы поместить между обкладками конденсатора стеклянную пластинку той же площади и толщиной 6 мм, если конденсатор присоединен к источнику напряжения 600 В?

35. По двум параллельным проводникам текут токи силой 8 и 12 А. Расстояние между проводниками 20 см. Найдите геометрическое место точек, в которых магнитная индукция поля токов равна нулю. Направления токов выберите самостоятельно.

36. По изолированному проводнику, имеющему форму кольца радиусом 25 см, течет ток силой 15 А. Два прямых бесконечно длинных проводника – один в плоскости кольцевого проводника, другой перпендикулярно ей, касаются кольцевого проводника в точках, лежащих на противоположных концах диаметра. Силы токов в проводниках 10 и 20 А. Определите напряженность в центре кольцевого проводника при произвольно выбранном направлении токов. Решение поясните рисунком.

37. Два проводника в виде полуколец лежат в одной плоскости и имеют общий центр. Определите напряженность в центре полуколец при следующих данных: радиус первого полукольца 10 см, второго – 20 см; токи текут в одном направлении и соответственно равны 1 и 4 А. Поле от подводящих проводников не учитывать.

38. В средней части длинного соленоида находится отрезок проводника с током силой 4 А и длиной 2 см, который расположен перпендикулярно оси соленоида. На этот отрезок проводника действует сила 10^{-5} Н. Определите силу тока в обмотке соленоида при условии, что на 1 см длины соленоида приходится 10 витков и сердечник отсутствует.

39. Квадратная рамка площадью 20 см^2 , состоящая из тысячи витков, расположена в однородном поле перпендикулярно полю с индукцией 10^{-3} Тл. В течение 0,02 с рамку удалили за пределы поля. Какая ЭДС находится в рамке?

40. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией 4 Тл движется прямолинейный проводник длиной 1 м со скоростью 25 м/с перпендикулярно магнитному полю. Вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику и вектору скорости. Концы проводника соединены гибким проводом вне поля.

Общее сопротивление цепи 5 Ом. Определите мощность, необходимую для движения проводника.

41. Напряженность магнитного поля замкнутого кольцеобразного соленоида равна 5 600 А/м. Средний диаметр кольца – 20 см, площадь сечения магнитопровода – 5 см². Магнитная проницаемость сердечника – 800 Гн/м. Найдите энергию магнитного поля соленоида.

42. Однородное электрическое поле напряженностью 20 кВ/м и однородное магнитное поле напряженностью 3 200 А/м взаимно перпендикулярны. В этих полях прямолинейно движется электрон. Определите скорость электрона.

43. Индуктивность колебательного контура 5 мкГн. Он настроен на длину волны 100 м. Определите емкость контура.

44. Колебательный контур состоит из катушки, имеющей 10 витков на 1 см и объем 30 см; и плоского конденсатора, расстояние между обкладками которого 0,5 см. Площадь обкладок по 15 см². Диэлектриком служит воздух. На какую длину волны будет резонировать этот контур?

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 $\lambda = 0,4$ мкм.

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

47. Угол между спектрами вторых порядков равен 36°. Определите длину волны света, падающего на дифракционную решетку $d = 4$ мкм.

48. Найдите угол полной поляризации при отражении от черного зеркала. Показатель его преломления $n = 1,327$.

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

50. Определите 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 $0,66 \text{ мкм}$. Металл освещается светом, длина волны которого $0,4 \text{ мкм}$. Определите максимальную скорость электронов, выбиваемых светом из металла.

53. Фотон с энергией $0,500 \text{ МэВ}$ рассеялся на свободном электроне под углом 60° . Найдите энергию рассеянного фотона, кинетическую энергию и импульс отдачи. Кинетической энергией электрона до соударения можно пренебречь.

54. Определите массу и импульс фотона, энергия которого равна 10 кэВ .

55. Энергия электрона возбужденного атома водорода $0,85 \text{ эВ}$. Вычислите длину волны де Бройля для электрона.

56. Определите частоту света, излучаемого двукратно ионизированным атомом лития при переходе электрона на уровень с главным квантовым числом 2, если радиус орбиты электрона изменился в 9 раз.

57. Вычислите дефект массы и энергию связи ядра ${}^{14}_7\text{N}$.

Ответы к задачам для самостоятельного решения

1. 16 м/с, 28 м/с². 2. 6 с⁻¹; 49. 3. 180 м/с²; 180,01 м/с²; 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. $2,58 \cdot 10^{20}$. 14. $2,05 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. 15. $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.
16. $32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; 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. 22. на 250 К. 23. на 260 К. 24. 0,5 Н/м. 25. В $4,2 \cdot 10^{40}$ раз.
26. 90 мкКл. 27. $2,19 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. 28. 0. 29. 200. 30. 0,45 пДж. 31. 0,26 нКл.
32. $1,8 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$. 33. 0,86 мкДж. 34. 2,25 мкДж. 35. 0,08 м; 0,4 м.
36. 64 А/м; 41 А/м. 37. 30 А/м. 38. 0,1 А. 39. 0,1 В. 40. 2 кВт. 41. 4,9 Дж.
42. 5 000 км/с. 43. 560 пФ. 44. 18,84 м. 45. 81 нм. 46. 3. 47. 602 нм.
48. 53°. 49. 37°. 50. 1,73. 51. в 8 раз. 52. $6,05 \cdot 10^5 \text{ м/с}$. 53. 0,335 МэВ;
0,165 МэВ; $0,235 \cdot 10^{-21} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 54. $1,78 \cdot 10^{-32} \text{ кг}$; $5,34 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 55. 1,3 нм.
56. $6,58 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$; 57. 0,112 а. е. м.; 104,6 МэВ.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К КОНТРОЛЬНЫМ И ТЕСТОВЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Способы задания движения материальной точки: векторный, координатный, естественный.
2. Скорость материальной точки. Мгновенная, средняя скорость движения. Кинематическое уравнение при неравномерном и равномерном движении.
3. Ускорение материальной точки. Мгновенное, среднее ускорение движения.
4. Движение материальной точки по окружности. Нормальное и тангенциальное ускорение.
5. Вращательное движение. Кинематическое уравнение движения.
6. Мгновенная, средняя угловая скорость. Закон движения при равномерном и неравномерном движении. Направление вектора скорости.
7. Мгновенное и среднее угловое ускорение движения. Направление вектора ускорения.
8. Связь линейных и угловых величин.
9. Динамика поступательного движения. Закон инерции. Инерциальные системы отсчета.
10. Основной закон динамики поступательного движения (II закон Ньютона). Принцип независимости действия сил.
11. Закон действия и противодействия.
12. Силы трения в природе. Примеры.
13. Импульс. Закон сохранения импульса.
14. Энергия. Закон сохранения энергии.
15. Потенциальная и кинетическая энергия.
16. Работа при перемещении тела; мощность, единицы измерения.
17. Абсолютно упругий и неупругий удары.

18. Абсолютно твердое тело. Момент инерции тела. Теорема Штейнера.
19. Вращающий момент. Основной закон динамики вращательного движения.
20. Момент импульса тела. Закон сохранения момента импульса.
21. Кинетическая энергия вращения.
22. Колебательный процесс. Виды колебаний. Гармонические колебания, уравнение, определение всех составляющих.
23. Собственные колебания, дифференциальное уравнение.
24. Свободные колебания, дифференциальное уравнение, логарифмический декремент затухания, физический смысл.
25. Вынужденные колебания, дифференциальное уравнение. Явление резонанса.
26. Сложение колебаний.
27. Механика жидкости. Уравнение неразрывности струи. Закон Паскаля. Закон Архимеда.
28. Уравнение Бернулли.
29. Основы молекулярно-кинетической теории.
30. Идеальный газ. Температура. Термометры, виды термометров.
31. Изотермический процесс. Уравнения, диаграммы. Получение процесса.
32. Изобарический процесс. Уравнения, диаграммы. Получение процесса.
33. Изохорический процесс. Уравнения, диаграммы.
34. Закон Дальтона. Парциальное давление. Получение процесса.
35. Объединенный газовый закон. Закон Авогадро. Уравнение Менделеева-Клапейрона.
36. Скорость поступательного движения молекул. Опыт Штерна. Вероятная, среднеквадратичная, средняя арифметическая скорость движения молекул.

37. Среднее число столкновений молекул, средняя длина свободного пробега молекул.
38. Явления переноса. Теплопроводность, уравнение Фурье.
39. Явления переноса. Диффузия, уравнение Фика.
40. Явления переноса. Вязкость, уравнение Ньютона.
41. Поверхностное натяжение жидкости. Добавочное давление. Формула Лапласа.
42. Явление смачивания и несмачивания. Полное смачивание. Формула Борелли-Жюрена.
43. Число степеней свободы. Внутренняя энергия массы вещества.
44. Теплоемкости газа. Молярная и удельная теплоемкости.
45. Физический смысл универсальной газовой постоянной. Уравнение Майера.
46. Основы термодинамики. Условия существования обратимого процесса. Первое начало термодинамики.
47. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.
48. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона, диаграмма. Получение процесса. Почему адиабата круче изотермы?
49. Второе начало термодинамики. Круговой процесс (цикл). Термический коэффициент.
50. Тепловые машины и холодильники. Цикл Карно.
51. Энтропия. Положения Клаузиуса.
52. Электростатика. Способы электризации тел.
53. Электрические заряды, единицы измерения. Взаимодействие зарядов в вакууме, в веществе. Закон сохранения заряда.
54. Закон Кулона для вакуума, вещества. Диэлектрическая проницаемость среды ϵ , физический смысл, единицы измерения.
55. Электрический диполь. Момент диполя, единицы измерения. Напря-

женность на продолжении оси диполя. Напряженность поля на перпендикуляре, восстановленном на оси из его середины.

56. Электрическое поле, его изображение, характеристики, единицы измерения. Напряженность электрического поля, физический смысл, единицы измерения. Потенциал поля, физический смысл, единицы измерения.

57. Теорема Остроградского-Гаусса. Линейная, поверхностная, объемная плотность зарядов, единицы измерения.

58. Работа по перемещению заряда в электрическом поле.

59. Эквипотенциальные линии. Доказательство перпендикулярности силовых и эквипотенциальных линий.

60. Напряженность заряженной нити. Напряженность заряженной плоскости. Напряженность между заряженными плоскостями.

61. Проводники, полупроводники, диэлектрики. Электропроводность полупроводников.

62. Емкость, единицы измерения. Емкость плоского конденсатора. Соединение конденсаторов, нахождение общей емкости при последовательном соединении. Соединение конденсаторов, нахождение общей емкости при параллельном соединении.

63. Энергия электрического поля.

64. Постоянный электрический ток, единицы измерения. ЭДС, падение напряжения в цепи. Закон Ома для участка цепи.

65. Закон Ома для замкнутого контура.

66. Сопротивление проводника, факторы на него влияющие.

67. Соединение проводников, нахождение общего сопротивления при последовательном соединении проводников.

68. Соединение проводников, нахождение общего сопротивления при параллельном соединении.

69. Зависимость сопротивления проводника от температуры, закон, диаграмма.

70. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры, закон, диаграмма.

71. Правила Кирхгофа.

72. Термоэлектрические явления, термопара, контактная разность потенциалов. Физический смысл постоянной термопары, термоэлектрический эффект.

73. Законы Вольты. Эффект Пельтье.

74. Основы электронной теории проводимости металлов и недостатки этой теории.

75. Магнитное поле, его изображение, характеристики поля. Магнитная индукция, физический смысл, определение направления вектора магнитной индукции.

76. Сила Ампера, закон Ампера, определение направления силы Ампера.

77. Сила Лоренца, частные случаи движения заряженных частиц в магнитном поле.

78. Взаимодействие проводников с током в магнитном поле. Сила взаимодействия проводников в магнитном поле.

79. Закон Био-Савара-Лапласа. Напряженность (индукция) магнитного поля в центре кругового проводника с током.

80. Индукция магнитного поля конечного проводника с током.

81. Индукция магнитного поля бесконечного проводника с током.

82. Магнитное поле соленоида, тороида.

83. Магнитный поток, единицы измерения. Теорема Гаусса для магнитного поля.

84. Работа по перемещению проводника в магнитном поле.

85. Диамагнетики.

86. Парамагнетики.

87. Ферромагнетики, применение ферромагнетиков, петля гистерезиса.

88. Опыты Фарадея, выводы.

89. Закон Фарадея, физический смысл знака «—».
90. Обобщенный закон Ома.
91. Индуктивность, единицы измерения, физический смысл.
92. Энергия магнитного поля. Плотность магнитного поля.
93. Колебательный контур, вращающийся в магнитном поле.
94. Индуктивное, емкостное сопротивление, физический смысл.
95. Свободные, вынужденные колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания, физический смысл.
96. Закон отражения света. Падающий, преломленный, отраженный лучи.
97. Относительный показатель преломления света, единицы измерения.
98. Абсолютный показатель преломления света, единицы измерения.
99. Закон преломления света.
100. Явление полного внутреннего отражения. Волоконная оптика.
101. Дисперсия света. Виды спектров.
102. Тонкие линзы. Формула тонкой линзы.
103. Явление поглощения света. Закон Бугера.
104. Фотометрические величины (поток излучения, сила света, яркость, освещенность). Единицы измерения.
105. Закон освещенности.
106. Монохроматичность и когерентность света.
107. Явление интерференции света. Поперечные, продольные волны. Условие максимума интерференции в отраженном свете.
108. Условие минимума интерференции в отраженном свете.
109. Принцип Гюйгенса-Френеля.
110. Ширина интерференционной полосы.
111. Частные случаи интерференции света. Интерференция света от плоскопараллельной пластины в проходящем и отраженном свете.
112. Частные случаи интерференции света. Кольца Ньютона.
113. Частные случаи интерференции света. Интерференция в клине.

114. Применение интерференции. Просветление оптики.
115. Явление дифракции света. Условие наблюдения дифракции.
116. Дифракционная решетка. Применение дифракционной решетки.
117. Условие максимума дифракции, постоянная дифракционной решетки.
118. Явление поляризации света. Естественный, поляризованный свет.
119. Вращение плоскости поляризации.
120. Закон Малюса.
121. Оптически активные вещества.
122. Анизотропные вещества. Двойное лучепреломление света.
123. Призма Николя. Поляроиды.
124. Закон Брюстера.
125. Абсолютно черное тело. Серое тело.
126. Тепловое излучение. Характеристики теплового излучения, единицы измерения.
127. Закон Кирхгофа для теплового излучения.
128. Закон Стефана-Больцмана.
129. Закон смещения Вина.
130. Формула Планка.
131. Применение законов теплового излучения. Оптическая пирометрия.
132. Явление фотоэффекта. Виды фотоэффекта.
133. Законы фотоэффекта.
134. Применение фотоэффекта.
135. Фотон, импульс фотона, масса покоя фотона, квант энергии.
136. «Красная граница фотоэффекта».
137. Уравнение Эйнштейна.
138. Фотоэлементы. Виды, применение фотоэлементов.
139. Корпускулярно-волновой дуализм света.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант 1

1. Под действием какой силы при прямолинейном движении тела изменение его координаты со временем происходит по закону $x = 10t - 20t^2$? Масса тела 5 кг.
2. Прямоугольный брусок размером $3,3 \times 3,3 \times 6,9$ см движется параллельно большому ребру. При какой скорости движения будет казаться кубом?
3. Два горизонтально вращающихся один над другим диска положены так, что плоскости их параллельны, а центры лежат на одной вертикали. Угловая скорость и момент инерции первого диска равны ω_1 и J_1 , а второго соответственно ω_2 и J_2 . Первый диск падает на второй, и система вращается как единое целое. Определите угловую скорость вращающейся системы и изменение кинетической энергии дисков после падения первого на второй.
4. Определите среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы двухатомного газа, если суммарная кинетическая энергия молекул одного киломоля этого газа 6,02 МДж.
5. При нагревании 1 киломоля азота было передано 1 000 Дж теплоты. Определите работу расширения при постоянном давлении.
6. Определите изменение энтропии 4 кг свинца при его охлаждении от 327 °С до 0 °С.
7. Два точечных заряда 30 нКл и (–10) нКл находятся в воздухе на расстоянии 10 см друг от друга. Определите напряженность поля, создаваемого этими зарядами в точке, удаленной на 9 см от положительного заряда и на 7 см от отрицательного заряда. Решение поясните рисунком.
8. Плоский конденсатор, расстояние между обкладками которого 2 см, а площадь каждой обкладки 200 см², зарядили до разности потенциалов 200 В и отключили от источника напряжения. Какую работу нужно совершить, чтобы увеличить расстояние между обкладками до 6 см?

9. ЭДС аккумулятора автомобиля 12 В. При силе тока в 3 А его КПД равен 0,8. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.

10. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, расположенным параллельно друг другу на расстоянии 10 см, текут токи силой 0,5 и 10 А. Определите магнитную индукцию поля в точке, удаленной на 10 см от каждого проводника. Рассмотрите все возможные случаи. Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур состоит из конденсатора электроемкостью 200 пФ и катушки индуктивностью 0,5 мкГн (без сердечника). Определите период собственных электромагнитных колебаний контура и длину излучаемой волны.

12. На непрозрачную пластинку с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна. Угол отклонения лучей, соответствующий первому дифракционному максимуму, равен 30° . Определите ширину щели, если длина волны падающего света 0,6 мкм.

13. Показатель преломления флюорита для света с длинами волн 670,8; 656,3; 643,8 нм равен соответственно 1,4323; 1,4325 и 1,4327. Вычислите фазовую и групповую скорости света вблизи длины волны 656,3 нм.

14. Определите давление на черную поверхность, создаваемое светом с длиной волны 0,4 мкм, если каждую секунду на 1 см^2 поверхности падает $6 \cdot 10^{16}$ фотонов.

Вариант 2

1. Выведите закон движения тела массой m , движущегося под действием постоянной силы F , если в момент $t = 0$ тело покоилось в начале координат ($x = 0$).

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

3. Сплошной цилиндр массой 10 кг катится без скольжения с постоянной

скоростью 10 м/с. Определите кинетическую энергию цилиндра и время до его остановки, если на него действует сила трения 50 Н.

4. Сколько молекул водорода находится в сосуде емкостью 2 л, если средняя квадратичная скорость движения молекул 500 м/с, а давление на стенки сосуда 10^3 Па?

5. Определите, какое количество теплоты необходимо сообщить углекислому газу массой 220 г, чтобы нагреть его на 20 К: а) при постоянном объеме; б) при постоянном давлении.

6. Найдите изменение энтропии при нагревании 1 кг воды от 0 до 100 °С и последующем превращении ее в пар при той же температуре.

7. Расстояние между двумя бесконечно длинными параллельными металлическими нитями, заряженными одноименно с линейной плотностью $6 \cdot 10^{-5}$ Кл/м, равно 5 см. Найдите напряженность поля в точке, удаленной на 5 см от каждой нити. Решение поясните рисунком.

8. Напряженность поля внутри плоского воздушного конденсатора с площадью обкладок по 100 см² равна 120 кВ/м. Напряжение на конденсаторе 600 В. Определите энергию, поверхностную плотность зарядов и емкость конденсатора.

9. Элемент с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 1,5 Ом замкнут на внешнее сопротивление 8,5 Ом. Определите: а) силу тока в цепи; б) падение напряжения во внешней цепи и внутри элемента; в) КПД элемента.

10. По кольцевому проводнику радиусом 10 см течет ток силой 4 А. Параллельно плоскости кольцевого проводника на расстоянии 2 см над его центром проходит бесконечно длинный прямолинейный проводник, по которому течет ток силой 2 А. Определите индукцию и напряженность магнитного поля в центре кольца. Рассмотрите все возможные случаи. Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 200 пФ и катушки индуктивностью 0,5 мкГн (без сердечника). Определите

длину излучаемой волны, если в катушку индуктивности введен ферритовый сердечник, магнитная проницаемость которого 1 000.

12. Определите длину световой волны спектральной линии, изображение которой, даваемое дифракционной решеткой в спектре третьего порядка, совпадает с изображением линии $\lambda = 0,38$ мкм в спектре четвертого порядка.

13. В черенковский счетчик, заполненный водой, влетает пучок релятивистских электронов с энергией 3,5 МэВ. Определите угол отклонения от оси конуса фиолетовых лучей, длина волны которых 0,4 мкм.

14. Световое давление, испытываемое зеркальной поверхностью площадью 1 см², равно 10^{-6} Па. Найдите длину волны монохроматического света, если каждую секунду на поверхность падают $5 \cdot 10^{12}$ фотонов.

Вариант 3

1. Выведите закон движения тела массой m под действием постоянной силы F , если в момент $t = 0$ начальная координата $x = 0$ и $v = v_0$.

2. При какой относительной скорости движения релятивистское сокращение длины движущегося тела составит 50 %?

3. Сплошной шар скатывается по наклонной плоскости, длина которой 10 м и угол наклона 30°. Определите скорость шара в конце наклонной плоскости. Трение шара о плоскость не учитывайте.

4. Найдите среднюю кинетическую энергию вращательного движения всех молекул, содержащихся в 0,25 г водорода при температуре 13 °С.

5. Какое количество теплоты нужно сообщить 1 киломолю кислорода, чтобы он совершил работу в 1 000 Дж: а) при изотермическом процессе; б) при изобарном?

6. Как изменится энтропия при изотермическом расширении 0,1 кг кислорода, если при этом объем его изменится от 2,5 л до 10 л?

7. Две параллельно расположенные плоскости заряжены — одна с поверх-

ностной плотностью $0,4 \cdot 10^{-6}$ Кл/м², другая $(-0,6 \cdot 10^{-6})$ Кл/м². Определите напряженность поля между плоскостями. Решение поясните рисунком.

8. Определите работу, совершаемую при раздвигании обкладок плоского конденсатора площадью 100 см², каждая на расстояние 1,5 см, при условии, что обкладки несут заряд 0,4 мкКл и $(-0,4)$ мкКл.

9. Определите ток короткого замыкания батареи, ЭДС которой 15 В, если при подключении к ней резистора сопротивлением 3 Ом сила тока в цепи 4 А.

10. По двум круговым виткам, имеющим общий центр, текут токи силой 5 и 4 А. Радиусы витков соответственно равны 3 и 4 см. Угол между их плоскостями 30°. Определите индукцию и напряженность в центре витков. Рассмотрите все возможные случаи. Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора электроемкостью 500 пФ, имеет период колебаний 0,5 мкс. Найдите энергию колебательного контура, если максимальная сила тока, протекающего по катушке индуктивности, равна 0,1 А. Определите длину волны, излучаемую этим контуром.

12. На грань кристалла каменной соли падает пучок параллельных рентгеновских лучей с длиной волны 0,15 нм. Под каким углом к атомной плоскости наблюдается дифракционный максимум третьего порядка, если расстояние между атомными плоскостями кристалла 0,285 нм?

13. Коэффициент линейного поглощения некоторого вещества равен $0,25 \text{ м}^{-1}$. Определите толщину слоя этого вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в 5 раз.

14. На зачерненную поверхность нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,45 мкм. Найдите число фотонов, падающих на площадку 1 м² в 1 с, если давление, производимое этим светом, равно 10^{-5} Па.

Вариант 4

1. Выведите закон движения тела массой m под действием постоянной силы F , если в момент $t = 0$ имеем $x = x_0$ и $v = v_0$.
2. π -мезон нестабильная частица. Собственное время его жизни составляет $2,6 \cdot 10^{-8}$ с. Какое расстояние пролетит π -мезон до распада, если он движется со скоростью $0,99 c$?
3. Полый цилиндр массой 2 кг катится по горизонтальной поверхности со скоростью 20 м/с. Определите силу, которую необходимо приложить к цилиндру, чтобы остановить его на пути 1,6 м.
4. Давление идеального газа 2 мПа, концентрация молекул $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы и температуру газа.
5. Азот массой 2 кг, находящийся при температуре 288 К, сжимают:
а) изотермически; б) адиабатно, увеличивая давление в 10 раз. Определите работу, затраченную на сжатие газа в обоих случаях.
6. Определите изменение энтропии при изобарном нагревании 0,1 кг азота от 17°C до 100°C .
7. Два металлических, полых концентрических шара заряжены. Диаметр большего шара 0,08 м, заряд на нем $(-40) \text{ нКл}$; диаметр меньшего шара 0,04 м, заряд на нем 20 нКл. Заряды равномерно распределены по поверхностям шаров. Определите напряженности поля в центре шаров и на расстояниях: а) 0,03 м, б) 0,05 м от центра. Решение поясните рисунком.
8. Определите энергию и силу притяжения обкладок плоского конденсатора при условии, что разность потенциалов между обкладками 5 кВ, заряд каждой обкладки 0,1 мкКл, расстояние между обкладками 1 см.
9. Два источника тока, ЭДС которых по 2 В и внутреннее сопротивление каждого 0,5 Ом, соединены последовательно. При каком, внешнем сопротивлении потребляемая полезная мощность будет максимальной?

10. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, расположенным параллельно друг другу на расстоянии 10 см, текут токи в одном направлении. Напряженность поля в точке, удаленной на 10 см от каждого проводника, равна 16,33 А/м. По одному из проводников течет ток силой 0,5 А. Определите силу тока, текущего по другому проводнику. Решение поясните рисунком.

11. Определите частоту колебаний, возникающих в колебательном контуре, состоящем из параллельно соединенных конденсатора электроемкостью 300 пФ и катушки индуктивности (без сердечника) длиной 20 см, сечением 2 см², содержащей 1 000 витков.

12. На щель шириной 0,1 мм падает нормально пучок параллельных лучей белого света (0,38–0,76) мкм. На экране, отстоящем от щели на расстоянии 1 м, наблюдается дифракционная картина. Найдите ширину дифракционного максимума второго порядка.

13. Какую ускоряющую разность потенциалов должен был бы пройти протон в глицерине, чтобы наблюдать черенковское свечение?

14. Принимая спектр Солнца за спектр абсолютно черного тела, определите давление солнечных лучей на земную поверхность при условии, что максимальная испускательная способность соответствует длине волны 0,48 мкм. Радиус Солнца равен $6,5 \cdot 10^5$ км. Коэффициент отражения солнечных лучей равен нулю. Расстояние от Земли до Солнца – $1,5 \cdot 10^8$ км.

Вариант 5

1. Тело массой 2 кг движется с ускорением, изменяющимся по закону $a = 5t - 10$. Определите силу, действующую на тело через 5 с после начала действия, и скорость в конце пятой секунды.

2. π -мезон – нестабильная частица. Собственное время его жизни составляет $2,6 \cdot 10^{-8}$ с. Определите, на сколько расстояние, пролетаемое π -мезоном,

при релятивистском замедлении времени больше, чем, если бы такого замедления не было. π -мезон движется со скоростью $0,99 c$.

3. Маховик, имеющий форму диска массой 30 кг и радиусом 10 см , был раскручен до частоты 300 мин^{-1} . Под действием силы трения диск остановился через 20 с . Найдите момент сил трения, считая его постоянным.

4. Определите среднее значение полной кинетической энергии одной молекулы неона, кислорода и водяного пара при температуре 600 К .

5. При каком процессе выгоднее производить расширение углекислого газа: адиабатном или изотермическом, если объем увеличивается в 2 раза? Начальная температура в обоих случаях одинаковая.

6. Лед массой 100 г , находящийся при температуре (-30°C) , превращается в пар. Определите изменение энтропии при этом.

7. Тонкое кольцо радиусом r заряжено равномерно с линейной плотностью τ . Определите напряженность поля в центре кольца и на высоте h , над кольцом по оси симметрии. Решение поясните рисунком.

8. Объемная плотность энергии электрического поля внутри заряженного конденсатора с твердым диэлектриком равна 3 Дж/м^3 . Определите давление, производимое пластинами конденсатора на диэлектрик.

9. Два источника тока, ЭДС которых по $1,5 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление каждого по $0,5 \text{ Ом}$, соединены параллельно. Какое сопротивление нужно подключить к ним, чтобы потребляемая полезная мощность была максимальна?

10. Два круговых витка с током лежат в одной плоскости и имеют общий центр. Радиус большего 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. Определите силы токов, текущих по круговым виткам. Решение поясните рисунком.

11. На какую длину волны резонирует колебательный контур, состоящий из катушки с индуктивностью 2 мкГн и конденсатора электроемкостью 2 нФ ?

12. Пучок параллельных лучей монохроматического света падает нормально на дифракционную решетку. Угол дифракции для спектра второго порядка 10° . Каким будет угол дифракции для спектра пятого порядка?

13. Показатель преломления сильвина для света с длинами волн 303,4; 214,4 и 185,2 нм равен соответственно 1,5440; 1,6618 и 1,8270. Вычислите фазовую и групповую скорости света вблизи длины волны 214,4 нм.

14. Определите силу светового давления на зеркальную поверхность площадью 100 см^2 , если интенсивность светового потока, падающего нормально на эту поверхность, равна $2,5 \text{ кВт/м}^2$.

Вариант 6

1. Тело массой 2 кг движется с ускорением, изменяющимся по закону $a = 5t - 10$. Определите силу, действующую на тело через 10 с после начала действия, и путь, пройденный телом за это время.

2. Найдите собственное время жизни нестабильной частицы μ -мезона, движущегося со скоростью 0,99 с, если расстояние, пролетаемое им до распада, равно примерно 10 км.

3. Какой скоростью должен обладать шар, катящийся без скольжения, чтобы подняться по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° , на высоту 2 м, если сила трения составляет 0,2 силы давления шара на плоскость? Чему равно время подъема?

4. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа равна $5 \cdot 10^{-21}$ Дж. Концентрация молекул составляет $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Определите давление газа.

5. Найдите работу и изменение внутренней энергии при адиабатном расширении 1 кг воздуха, если его объем увеличился в 10 раз. Начальная температура 15°C .

6. Железо массой 1 кг при температуре 100°C находится в тепловом кон-

также с таким же куском железа при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чему будет равно изменение энтропии при достижении равновесной температуры $50\text{ }^{\circ}\text{C}$? Молярная теплоемкость железа равна $25,14\text{ Дж/К}$.

7. Расстояние между двумя параллельно расположенными бесконечно длинными металлическими нитями равно 10 см . Одна нить заряжена с линейной плотностью $6 \cdot 10^{-5}\text{ Кл/м}$, другая $(-3 \cdot 10^{-5})\text{ Кл/м}$. Найдите напряженность поля в точке, удаленной на расстояние 10 см от каждой нити. Решение поясните рисунком.

8. Два конденсатора одинаковой электроемкости 6 мкФ каждый были заряжены – один до 100 В , другой до 200 В . Затем конденсаторы соединили параллельно. Определите напряжение батареи после соединения и изменение энергии системы.

9. Источник постоянного тока один раз подсоединяют к резистору сопротивлением 9 Ом , другой раз – 16 Ом . В первом и втором случаях количество теплоты, выделяющееся на резисторах за одно и тоже время, одинаково. Определите внутреннее сопротивление источника тока.

10. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам текут токи силой 4 и 6 А . Расстояние между проводниками 15 см . Определите геометрическое место точек, в которых индукция магнитного поля равна нулю. Решение поясните рисунком.

11. Найдите максимальное напряжение на обкладках конденсатора в колебательном контуре, если электроемкость конденсатора 6 пФ , индуктивность катушки $0,5\text{ мГн}$, максимальная сила тока 20 А .

12. Какую разность длин волн может «разрешить» дифракционная решетка в спектре второго порядка для фиолетовых лучей $0,4\text{ мкм}$, если период решетки 2 мкм , ее ширина – 2 см ?

13. Определите, как изменится интенсивность монохроматического света при прохождении через слои поглотителя; толщина первого слоя 10 мм , второго – 20 мм , коэффициенты линейного ослабления соответственно равны $0,1$

и $0,3 \text{ см}^{-1}$.

14. Энергетическая освещенность поверхности Земли равна $1,4 \text{ кВт/м}^2$. Определите давление, обусловленное светом, принимая коэффициент отражения равным 0,6.

Вариант 7

1. Под действием постоянной силы 10 Н тело движется прямолинейно и зависимость пройденного пути от времени имеет вид $s = 10 - 5t + 2t^2$. Найдите массу тела.

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

3. Какой скоростью должен обладать шар, катящийся без скольжения, чтобы подняться по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° , на высоту 2 м , если сила трения составляет $0,2$ силы давления шара на плоскость? Чему равно время подъема? Определите, с какой скоростью и в течение какого времени шар скатится обратно.

4. В сосуде емкостью 200 см^3 находится газ при температуре 47°C . Из-за утечки газа из колбы просочилось 10^{21} молекул. На сколько снизилось давление газа в сосуде?

5. Определите количество теплоты, сообщенное 20 г азота, если он был нагрет от 27°C до 177°C . Какую работу при этом совершит газ, и как изменится его внутренняя энергия?

6. Водород массой 10 г изобарно расширяется, при этом объем его увеличивается в 2 раза. Определите изменение энтропии водорода при этом процессе.

7. Две параллельные плоскости одноименно заряжены с поверхностной плотностью зарядов $0,5 \cdot 10^{-6}$ и $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$. Определите напряженность поля: а) между плоскостями; б) вне плоскостей. Решение поясните рисунком.

8. Давление, производимое обкладками плоского конденсатора на твердый диэлектрик, находящийся между ними, равно $1,5 \text{ Па}$. Определите энергию электрического поля конденсатора и объемную плотность энергии, если площадь обкладок 100 см^2 , расстояние между ними – $0,5 \text{ см}$.

9. Электроплитка имеет две одинаковые спирали. Начертите все возможные схемы включения этих спиралей и определите отношение количеств теплоты, полученных от плитки за одно и то же время в каждом из этих случаев.

10. По круговому проводнику радиусом $0,12 \text{ м}$ течет ток силой $0,2 \text{ А}$. Перпендикулярно плоскости кругового проводника проходит бесконечно длинный проводник, по которому течет ток силой $0,1 \text{ А}$. Индукция магнитного поля в центре кругового проводника – $11,3 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$. Определите, на каком расстоянии от центра кругового проводника находится прямолинейный проводник. Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки индуктивности. Определите частоту колебаний, возникающих в контуре, если максимальная сила тока в катушке индуктивности $1,2 \text{ А}$, максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора – 1200 В , энергия контура – $1,1 \text{ мДж}$.

12. Дифракционная решетка имеет 800 штрихов на одном миллиметре; на нее нормально падает монохроматический свет с длиной волны $0,585 \text{ мкм}$. Определите, как изменится угол дифракции для спектра второго порядка, если взять решетку с 500 штрихами на одном миллиметре.

13. В черенковском счетчике из каменной соли пучок релятивистских протонов излучает в красной области спектра $0,67 \text{ мкм}$ в конусе с раствором $98^\circ 38'$. Определите кинетическую энергию протонов.

14. Давление света на зеркальную поверхность, расположенную на расстоянии 2 м от лампочки нормально к падающим лучам, равно $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$. Определите мощность лампочки, расходуемую на излучение.

Вариант 8

1. Под действием постоянной силы 10 Н тело движется прямолинейно и зависимость пройденного пути от времени имеет вид: $s = 10 - 5t + 2t^2$. Найдите массу тела.
2. Электрон, скорость которого 0,97 с, движется навстречу протону, имеющему скорость 0,5 с. Определите скорость их относительного движения.
3. Сначала диск, а потом обруч скатываются с наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтом. Чему равны их ускорения? Силой трения пренебречь.
4. Сколько молекул газа находится в сосуде емкостью 1,5 л при нормальных условиях?
5. Во сколько раз увеличится объем 1 моля водорода при изотермическом расширении при температуре 27 °С, если при этом была затрачена теплота, равная 4 кДж.
6. Определите изменение энтропии, происходящее при смешивании 5 кг воды, находящейся при температуре 280 К, и 8 кг воды, находящейся при температуре 350 К.
7. В центре металлической поллой сферы, радиус которой 0,04 м, расположен точечный заряд 10 нКл. Заряд 40 нКл равномерно распределен по поверхности сферы. Определите напряженность поля в точках, удаленных от центра сферы на расстояние: а) 2 см; б) 8 см. Решение поясните рисунком.
8. Найдите напряженность поля плоского конденсатора и объемную плотность энергии, если расстояние между обкладками конденсатора 0,05 м. Конденсатор заряжен до разности потенциалов 600 В и обладает энергией 3,2 мкДж.
9. При каком условии сила тока во внешней цепи будет одинаковой при последовательном и параллельном соединениях n одинаковых элементов? Чему будет равно отношение потребляемых мощностей в этих случаях?
10. Проводник длиной 1 м согнут в виде квадрата. Определите индукцию

магнитного поля и напряженность в точке пересечения диагоналей квадрата, если по проводнику течет ток силой 4 А. Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 5 мГн и плоского конденсатора. Расстояние между обкладками конденсатора 4 мм, площадь обкладок – 2 см², диэлектрик – слюда. Как изменится период колебаний в контуре, если в качестве диэлектрика взять эбонит?

12. На кристалл кальцита, расстояние между атомными плоскостями которого 0,3 нм, падает пучок параллельных рентгеновских лучей, длина волны которых 0,147 нм. Определите, под каким углом к поверхности кристалла (угол скольжения) должны падать рентгеновские лучи, чтобы наблюдался дифракционный максимум первого порядка.

13. Найдите коэффициент линейного поглощения вещества, для которого толщина слоя половинного ослабления интенсивности монохроматического света равна 2,46 м.

14. Энергетическая освещенность поверхности, освещаемой нормально падающими лучами равна 3 кВт/м². Вычислите световое давление, если поверхность черная.

Вариант 9

1. Под действием постоянной силы 10 Н тело движется прямолинейно и зависимость пройденного пути от времени имеет вид: $s = 10 - 5t + 2t^2$. Найдите зависимость ускорения от времени. Определите, в какой момент времени сила, действующая на тело, равна нулю.

2. Радиоактивное ядро, вылетевшее из ускорителя со скоростью 0,4 с, выбросило в направлении своего движения β -частицу со скоростью 0,75 с относительно ускорителя. Найдите скорость частицы относительно ядра.

3. Шар и сплошной цилиндр имеют одинаковую массу 5 кг каждый и катятся с одинаковой скоростью 10 м/с. Найдите кинетические энергии этих тел.

4. Определите концентрацию молекул идеального газа при температуре

450 К и давлении 1,5 МПа.

5. Водород, занимающий объем 5 л и находящийся под давлением 10^5 Па, адиабатно сжат до объема 1 л. Найдите работу сжатия и изменение внутренней энергии водорода.

6. Объем гелия, масса которого 2 кг, увеличился в 5 раз: а) изотермически; б) адиабатно. Каково изменение энтропии в этих случаях?

7. Тонкое полукольцо радиусом r заряжено равномерно с линейной плотностью τ . Определите напряженность поля в центре кривизны полукольца. Решение поясните рисунком.

8. Два конденсатора одинаковой емкости 6 мкФ каждый заряжены – один до 100 В, другой до 200 В. Затем конденсаторы соединили последовательно. Определите изменение энергии системы.

9. В течение 5 с по резистору сопротивлением 10 Ом течет ток, сила которого равномерно возрастает. В начальный момент сила тока равна нулю. Определите заряд, протекающий за 5 с, если количество теплоты, выделившееся в резисторе за это время, равно 500 Дж.

10. Прямой проводник согнут в виде прямоугольника со сторонами длиной 0,2 м и 0,3 м. Какой силы ток нужно пропустить по этому проводнику, чтобы напряженность поля в точке пересечения диагоналей была 19 А/м? Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 5 мГн и плоского конденсатора. Расстояние между обкладками конденсатора 4 мм, площадь обкладок – 2 см², диэлектрик – слюда. Как изменится период колебаний в контуре, если между обкладками конденсатора в качестве диэлектрика вместо слюды ввести парафин?

12. На узкую щель нормально падает монохроматический свет. Угол дифракции для спектра второго порядка 2° . Скольким длинам волн падающего света равна ширина щели?

13. Показатель преломления воды при 20 °С для света с длинами волн

670,8, 656,3 и 643,8 нм равен соответственно 1,3308, 1,3311 и 1,3314. Вычислите отношение фазовой к групповой скорости света вблизи длины волны 656,3 нм.

14. Свет $\lambda = 0,6$ мкм, падая нормально на зеркальную поверхность, оказывает давление 10^{-6} Па. Определите число фотонов, падающих на 1 м^2 поверхности.

Вариант 10

1. Тело массой 2 кг движется прямолинейно со скоростью, зависимость которой от времени выражается уравнением $v = 2,5t^2 + 10t$. Определите путь, пройденный телом за 5 с, и силу, действующую на тело в конце пятой секунды.

2. Скорость света в стоячей воде $u = c/n$, где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления воды. Найдите скорость света в воде, движущейся равномерно относительно источника света со скоростью v .

3. 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. Определите угловую скорость, с которой начнет вращаться стержень, если пуля застрянет в нем.

4. Определите температуру идеального газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул $3,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

5. Газ, занимающий объем 20 л под давлением 1 МПа, был изобарно нагрет от 323 до 473 К. Найдите работу расширения газа.

6. Определите изменение энтропии 1 моля идеального газа при изохорном, изобарном и изотермическом процессах.

7. Два точечных одноименных заряда по $2,7 \cdot 10^{-8}$ Кл находятся в воздухе на расстоянии 5 см друг от друга. Определите напряженность поля, создаваемого этими зарядами в точке, удаленной на расстояние 3 см от одного заряда

и 4 см от другого. Решение поясните рисунком.

8. Плоский воздушный конденсатор с площадью обкладок 150 см^2 и расстоянием между ними 6 мм заряжен до 400 В. Определите, как изменятся емкость и энергия конденсатора, если параллельно его обкладкам внести металлическую пластину толщиной 1 мм.

9. Сила тока в резисторе равномерно возрастает от нулевого значения в течение 10 с. За это время выделилось количество теплоты 500 Дж. Определите скорость возрастания тока, если сопротивление резистора 10 Ом.

10. Прямой проводник длиной 90 см согнут в виде равностороннего треугольника. Какой силы ток нужно пропустить по этому проводнику, чтобы индукция магнитного поля в точке пересечения высот треугольника равнялась $1,24 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$? Решение поясните рисунком.

11. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора емкостью 1 нФ, имеет частоту колебаний 5 МГц. Найдите максимальную силу тока, протекающего по катушке, если энергия контура 0,5 мкДж.

12. Две дифракционные решетки имеют одинаковую ширину 4 мм, но разные периоды, равные 2 и 4 мкм. Определите и сравните их наибольшую разрешающую способность для желтой линии натрия $\lambda = 0,589 \text{ нм}$.

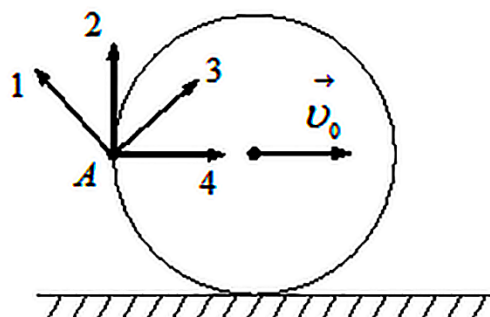
13. Для каких частиц возникает черенковское излучение при их движении в воде, когда их кинетическая энергия превышает 972 МэВ?

14. Определите длину волны монохроматического света при нормальном падении его на зеркальную поверхность площадью 1 м^2 , если каждую секунду падает $5 \cdot 10^{18}$ фотонов.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

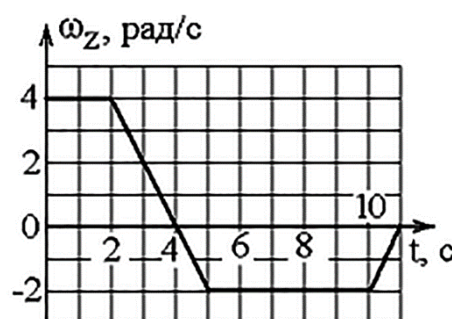
1. Диск катится равномерно по горизонтальной поверхности со скоростью v_0 без проскальзывания. Вектор скорости точки A , лежащей на ободе диска, ориентирован в направлении..

1) 3; 2) 1; 3) 2; 4) 4.



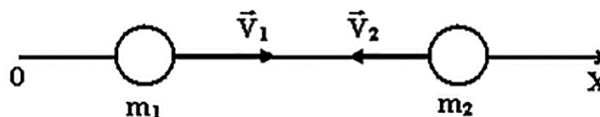
2. Твердое тело начинает вращаться вокруг оси Z с угловой скоростью, проекция которой изменяется со временем, как показано на графике. Через 11 с тело окажется повернутым относительно начального положения на угол (в рад):

1) 0; 2) 12; 3) 24; 4) 4.



3. Вдоль оси Ox навстречу друг другу движутся две частицы с массами $m_1 = 4$ г и $m_2 = 2$ г; скоростями $v_1 = 5$ м/с и $v_2 = 4$ м/с соответственно. Проекция скорости центра масс на ось Ox (в единицах СИ) равна...

2.



4. Материальная точка массой $m = 100$ г начинает двигаться под действием силы $F = 3ti + 2t^2j$ (Н). Если зависимость радиуса-вектора материальной точки от времени имеет вид $r = t^2i + t^3j$ (м), то мощность (Вт), развиваемая силой в момент времени $t = 1$ с, равна...

12.

5. Фигурист вращается вокруг вертикальной оси с определенной частотой. Если он разведет руки в стороны, увеличив тем самым свой момент инерции относительно оси вращения в 1,5 раза, то:

1) частота вращения фигуриста и его кинетическая энергия вращения уменьшатся в 1,5 раза;

2) частота вращения фигуриста возрастет в 1,5 раза, а его кинетическая энергия вращения – в 2,25 раза;

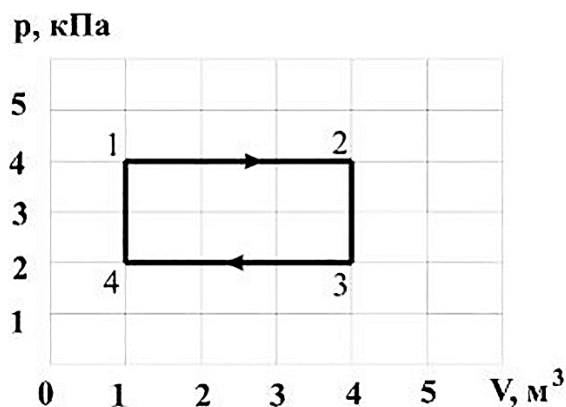
- 3) частота вращения фигуриста уменьшится в 1,5 раза, а его кинетическая энергия вращения – в 2,25 раза;
4) частота вращения фигуриста и его кинетическая энергия вращения возрастут в 1,5 раза.

6. Средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа при температуре T равна $\langle E \rangle = ikT/2$. Здесь $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}} + 2n_{\text{колеб}}$, где $n_{\text{пост}}$, $n_{\text{вр}}$, $n_{\text{колеб}}$ – число степеней свободы поступательного, вращательного и колебательного движений молекулы. При условии, что имеют место поступательное, вращательное и колебательное движение, для водорода (H_2) число i равно...

1) 7; 2) 3; 3) 6; 4) 5.

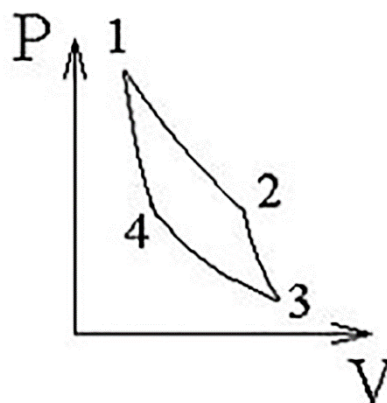
7. В процессе, представленном на рисунке, работа идеального одноатомного газа (в кДж) при нагревании равна...

1) 12; 2) 8; 3) 6; 4) 16.



8. На рисунке схематически изображен цикл Карно в координатах (p, V) . Уменьшение энтропии имеет место на участке...

1) 3–4; 2) 1–2; 3) 2–3; 4) 4–1.

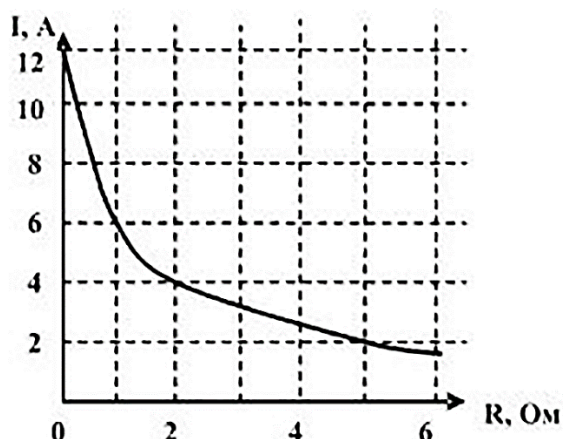


9. Два проводника заряжены до потенциалов 34 В и –16 В. Заряд 100 нКл нужно перенести со второго проводника на первый. При этом необходимо совершить работу (в мкДж), равную...

5.

10. На рисунке представлены результаты экспериментального исследования зависимости силы тока в цепи от значения сопротивления, подключенного к источнику постоянного тока. ЭДС источника и его внутреннее сопротивление соответственно равны...

1) 12 В, 1 Ом; 2) 9 В, 0,5 Ом; 3) 24 В, 3 Ом.



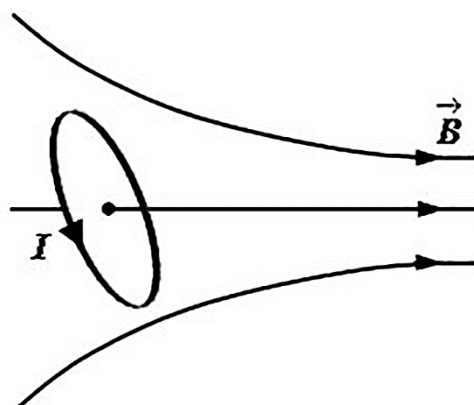
11. Небольшой контур с током I помещен в неоднородное магнитное поле с индукцией B . Плоскость контура перпендикулярна плоскости чертежа, но не перпендикулярна линиям индукции. Под действием поля контур...

1) повернется по часовой стрелке и сместится вправо;

2) повернется против часовой стрелки и сместится вправо;

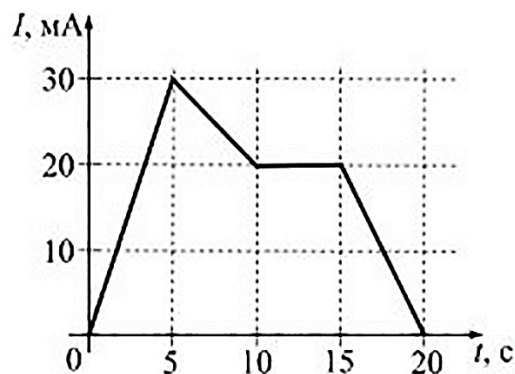
3) повернется против часовой стрелки и сместится влево;

4) повернется по часовой стрелке и сместится влево.



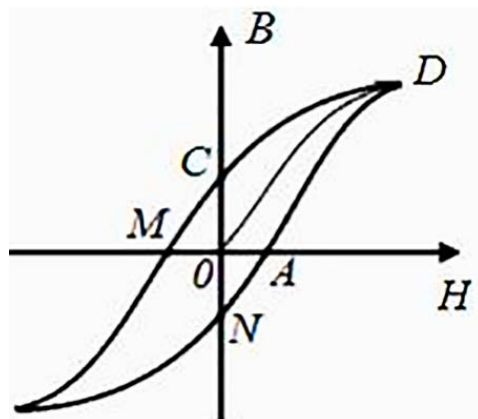
12. На рисунке показана зависимость силы тока от времени в электрической цепи с индуктивностью 1 мГн. Модуль среднего значения ЭДС самоиндукции в интервале от 0 до 5 с (в мкВ) равен...

1) 6; 2) 30; 3) 0; 4) 15.



13. На рисунке приведена петля гистерезиса. Здесь B – магнитная индукция поля в веществе, H – напряженность внешнего магнитного поля. Коэрцитивной силе на графике соответствует отрезок...

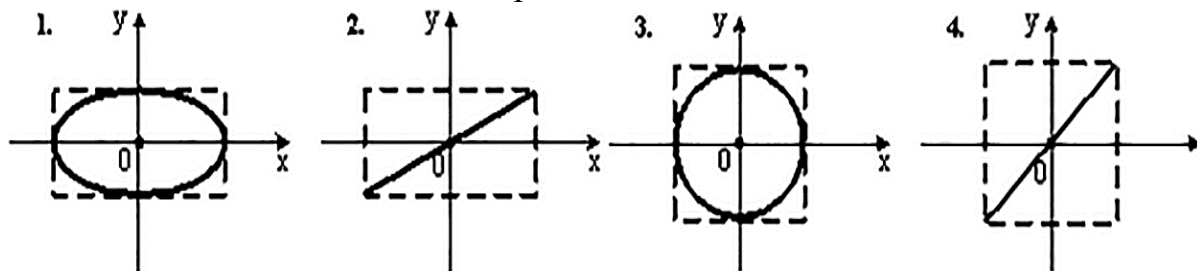
1) OM ; 2) OC ; 3) AM ; 4) ON .



14. Установившиеся вынужденные колебания заряда в последовательном RLC контуре происходят с частотой...

1) генератора; 2) резонансной $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$; 3) затухающих колебаний $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$; 4) собственных колебаний $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$.

15. Складываются два взаимно перпендикулярных колебания. Установите соответствие между номером соответствующей траектории и законами колебаний точки M вдоль осей координат OX , OY .



$x = A_1 \sin(\omega t), y = A_2 \sin(\omega t + \pi/2) - 1$;

$x = A_1 \sin(\omega t), y = A_2 \sin(\omega t) - 2$;

$x = A \sin(\omega t), y = A \sin(\omega t + 3\pi/2) - 3$;

$x = A \sin(\omega t), y = A \sin(\omega t) - 4$;

$x = A_1 \sin(\omega t), y = A_2 \sin(\omega t + \pi)$

16. Электромагнитная волна частоты 3,0 МГц переходит из вакуума в диэлектрик с проницаемостью $\epsilon = 4,0$. При этом ее длина волны уменьшится на (метров)...

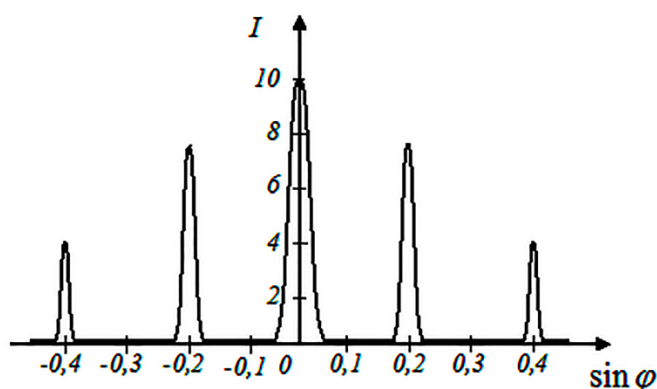
1) 50; 2) 100; 3) $5 \cdot 10^4$; 4) 0,50.

17. В упругой среде плотностью ρ распространяется плоская синусоидальная волна. Если амплитуда волны увеличится в 4 раза, а частота в 2 раза, то плотность потока энергии (вектор Умова) увеличится в раз...

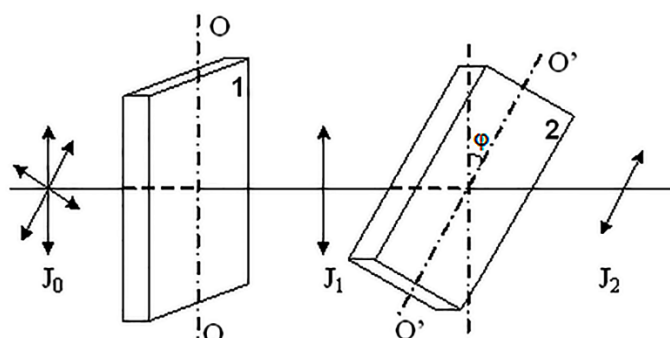
64.

18. При дифракции на дифракционной решетке наблюдается зависимость интенсивности излучения с длиной волны $\lambda = 400$ нм от синуса угла дифракции, представленная на рисунке (изображены только главные максимумы). Количество штрихов на 1 мм длины решетки равно...

500.

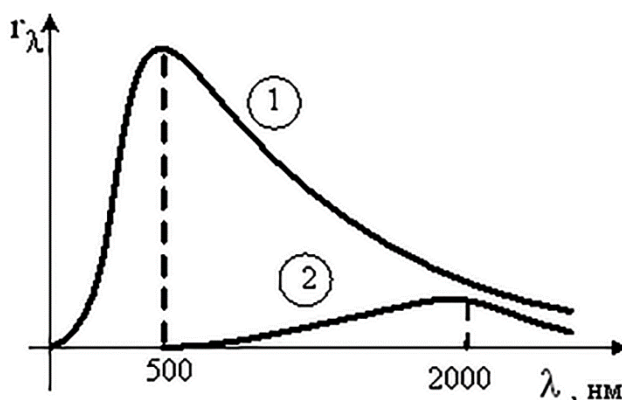


19. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если J_0 – интенсивность естественного света, а J_1 и J_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки соответственно 1 и 2, то при угле φ между направлениями OO и $O'O'$, равном 30° , J_2 и J_0 связаны соотношением...



- 1) $J_2 = 3J_0/8$; 2) $J_2 = J_0/4$;
3) $J_2 = J_0/8$; 4) $J_2 = 3J_0/4$.

20. На рисунке представлены кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах T_1 и T_2 . Верным является соотношение...



- 1) $T_1 = 4T_2$; 2) $T_2 = 4T_1$;
3) $T_1 = 2T_2$; 4) $T_2 = 2T_1$.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев, Б. В. Курс общей физики в 3 кн. Кн. 1: Механика / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. М. : Учебник, 2019. – 353 с.
2. Бондарев, Б. В. Курс общей физики в 3 кн. Кн. 2: Электромагнетизм, оптика, квантовая физика / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. М. : Учебник, 2019. – 441 с.
3. Бондарев, Б. В. Курс общей физики в 3 кн. Кн. 3: Термодинамика, статистическая физика, строение вещества / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. М. : Учебник, 2019. – 369 с.
4. Айзензон, А. Е. Физика : учебник и практикум / А. Е. Айзензон. М. : Юрайт, 2020. – 335 с
5. Сборник задач по физике : учебное пособие / Р. Ц. Безверхняя [и др.]. СПб. : Лань, 2007. – 126 с.

Учебное издание

*Сергеева Виктория Васильевна,
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент*

*Илюхина Татьяна Алексеевна,
кандидат технических наук, доцент*

*Сенникова Наталья Николаевна,
кандидат технических наук, доцент*

*Кривуца Зоя Федоровна,
доктор технических наук, доцент*

ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие

Подписано в печать 21.02.2023 г.
Формат 60х90/16. Уч.-изд. л – 3,80. Усл. печ. л. – 8,17.
Тираж по требованию. Заказ 12.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86