

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Физика: Методические указания. Задания и примеры решения задач  
( контрольные работы 4, 5, 6). /Сост. *С.Ф.Киселева, Т.В.Черкасова,  
Л.А. Лисицына,, Н.О Солоницина.*  
Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-  
строительного университета, 2015. – 70 с.

## ФИЗИКА

**Рецензент**  
**Ю.В. Соловьева** д.ф.-м.н., профессор кафедры физики  
**Редактор**  
**Л.И.Тришкина** д.ф.-м.н., профессор кафедры физики

Методические указания и контрольные задания по физике для  
студентов заочного обучения всех специальностей

Рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим  
семинаром кафедры физики. Протокол № от 12.01.2015г.

**Методические указания.**  
**Задания и примеры решения задач (контрольные**  
**работы 4, 5, 6)**

*Составители: С.Ф.Киселева, Т.В.Черкасова,  
Л.А. Лисицына, Н.О. Солоницина*

с 01.09.2015  
до 01.09.2016

Томск 2015

Изд. лиц. № 021253 от 31.10.97. Подписано в печать 20.01.15  
Формат 60x84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Печать офсет. Уч.-изд.  
Бесплатно. Заказ №

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2  
Отпечатано с оригинал-макета ООП ТГАСУ  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА КУРСА ФИЗИКИ (ч II)

### ВВЕДЕНИЕ

Методические указания составлены для студентов всех направлений подготовки бакалавров и специалистов всех форм обучения.

В указаниях излагается краткая теория по магнетизму, волновой оптике, квантовой природе излучения, некоторых вопросов физики атомного ядра и элементарных частиц, приведены примеры решения и оформления задач по данным темам, а также задачи для самостоятельного решения. Методические указания могут быть использованы на практических занятиях и для самостоятельной работы студентами.

В процессе обучения формируются следующие, предусмотренные Федеральным Государственным образовательным стандартом (ФГОС-3), компетенции:

ОК-1: владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения.

ОК-8: способность работать самостоятельно.

ОК-9: способность к целенаправленному применению базовых знаний в области естественных наук в профессиональной деятельности.

Работа с методическими указаниями способствует приобретению студентом:

Знаний: основных явлений, фундаментальных понятий, законов.

Умений: решать типовые задачи по данному разделу, применять полученные знания по физике при изучении других дисциплин, выделять конкретное физическое содержание в прикладных задачах профессиональной деятельности.

Навыков: основных методов постановки исследования и решения задач.

### ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

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

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

Магнитное поле в веществе. Магнитные моменты атомов. Типы магнетиков. Намагниченность. Микро- и макро токи. Теория диа- и парамагнетизма. Магнитная восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры. Закон полного тока для магнитного поля в веществе. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики. Опыты Столетова. Кривая намагничивания. Магнитный

гистерезис. Точка Кюри. Домены. Спиновая природа ферромагнетизма.

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

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И КОЛЕБАНИЯ**

Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний. Электрический колебательный контур. Энергия электромагнитных колебаний.

Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс. Электромагнитные волны. Дифференциальное уравнение электромагнитной волны. Основные свойства электромагнитных волн. Монохроматические волны. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии. Вектор Умова-Пойтинга. Излучение диполя.

## **ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников.

Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на одной щели и дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа-Брэгга. Принцип голографии. Исследование структуры кристаллов. Оптически неоднородная среда. Дисперсия света. Области нормальной и аномальной

дисперсии. Электронная теория дисперсии света. Эффект Доплера. Излучение Вавилова-Черенкова. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Поляроиды и поляризационные призмы. Закон Малюса.

## **КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ**

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

## **ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**

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

линейном гармоническом осцилляторе. Атом водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Понятие об энергетических уровнях молекул. Спектры атомов и молекул. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения. Понятия о лазере.

### **ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

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

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Трофимова Т.И. Курс физики (учебное пособие для ВУЗов)/Т.И.Трофимова.- М: Издательский центр «Академия», 2011.-560с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.2/И.В.Савельев. – М.: Наука, 1989. -430с.
3. Киселева С.Ф., Конева Н.А., Черников М.И. Мультимедийный учебный комплекс по курсу общей физики. – Томск: ТГАСУ. 2012г.

4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики/А.А.Детлаф,,Б.М. Яворский,. – М.: Высшая школа, 2002. – 718 с.
5. Физика. Ч.1. Механика. Электростатика. Электромагнетизм. Учебное пособие / под. ред. С.В. Старенченко, С.Ф. Киселева – Томск: Изд-во ТГАСУ.- 2012. – 80с.
6. Киселева С.Ф., Конева Н.А., Черников М.И. Мультимедийное учебное пособие по общей физике. - Томск: ТГАСУ. Второе переработанное и дополненное издание. 2011 г.
7. Трофимова Т.И. Сборник задач с решениями /Т.И.Трофимова. М: Высшая школа, 2007.-591с.
8. Волькенштейн В.С. Сборник задач/В.С.Волькенштейн. - СПб: Книжный мир, 2008.-397с.
9. Физический практикум. Т.2. Электричество, магнетизм. Учебное пособие / под. ред. С.В. Старенченко. – Томск: Изд-во ТГАСУ.- 2010. – 212с
10. Дерюгин Е.Е., Соловьева М.И. Квантовая природа излучения. Методические указания /Е.Е.Дерюгин, М.И.Соловьева – Томск: ТГАСУ, 2013.-41с.
11. Физический практикум. Т.3. Волновая и квантовая оптика. Учебное пособие / под. ред. С.В. Старенченко. – Томск: Изд-во ТГАСУ.- 2011.-132с.
12. Лисицына Л.А. Происхождение радиационного поля Земли: учебное пособие/Л.А.Лисицына. –Томск.:Изд-во ТГАСУ, 2004.-37с.

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ И ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. За время изучения курса общей физики слушатель ИНО должен представить в учебное заведение три контрольных работ.

2. Номера задач, которые должен включить в свою контрольную работу, определяются по таблицам вариантов. Последняя цифра шифра является номером варианта.

3. Контрольные работы нужно выполнить чернилами в школьной тетради, на обложке которой привести сведения по следующему образцу:

Слушатель ИНО при ТГАСУ  
Киселев А.В.  
Шифр 251020  
Адрес: г. Томск, Томской области,  
ул. Фрунзе, 24, кв.5  
Контрольная работа 1 по физике

4. Условия задач в контрольной работе надо переписать полностью без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставлять поля.

5. В конце контрольной работы указать, каким учебником или учебным пособием студент пользовался при изучении физики (название учебника, автор, год издания). Это делается для того, чтобы рецензент в случае необходимости мог указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

6. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан представить ее на повторную рецензию, включив в нее те задачи, решения которых оказались

неверными. Повторную работу необходимо представить вместе с незачтенной работой.

### 7. Правила оформления задач

- Решения задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями. Выполнить чертеж или схему, разъясняющую решение задачи.
- Решать задачу надо в общем виде, т.е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.
- После получения расчетной формулы для проверки правильности ее следует подставить в правую часть формулы вместо символов величин обозначения единиц измерения этих величин, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине. Если такого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.
- Числовые значения величин при подстановке их в расчетную формулу следует выражать только в единицах СИ. В виде исключения допускается выразить в любых, но одинаковых единицах числовые значения однородных величин, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.
- При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа числовые значения величин записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместе 3520 надо  $3,52 \cdot 10^3$ , вместо 0,00129 записать  $1,29 \cdot 10^{-3}$  и т.п.

- Вычисления по расчетной формуле надо проводить с соблюдением правил приближенных вычислений. Как правило, окончательный ответ следует записывать с тремя значащими цифрами. Это относится и к случаю, когда результат получен с применением калькулятора.

Контрольная работа №4

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

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

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

где  $\vec{B}$  - магнитная индукция;  $\vec{p}_m$  - магнитный момент контура с током:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

где  $S$  – площадь контура с током;  $I$  – сила электрического тока;  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали к поверхности контура.

Связь магнитной индукции  $\vec{B}$  и напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля:

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

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  - магнитная проницаемость среды.

Закон Био-Савара-Лапласа:

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

где  $\vec{B}$  - магнитная индукция поля, создаваемая элементом тока  $I d\vec{l}$ ;  $\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный от  $d\vec{l}$  к точке, в которой определяется магнитная индукция.

Модуль вектора магнитной индукции:

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

где  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Принцип суперпозиции магнитных полей:

поле, создаваемое несколькими проводниками с током:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i;$$

поле, созданное несколькими элементами тока проводника:

$$\vec{A} = \int d\vec{B},$$

где  $\vec{B}$  - магнитная индукция результирующего поля; где  $\vec{B}_i$  - магнитная индукция складываемых полей.

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{R},$$

где  $R$  – расстояние от проводника до рассматриваемой точки.

Магнитная индукция в центре кругового проводника с током:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{2R},$$

где  $R$  – радиус кривизны проводника (радиус кругового витка).

Закон Ампера:

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

где  $d\vec{F}$  - сила, действующая на элемент тока  $I d\vec{l}$ ; помещенный в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ .

Модуль силы Ампера:

$$dF = IBdl \sin \alpha$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$ .

Сила взаимодействия двух прямых бесконечных прямолинейных параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ :

$$dF = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl$$

где  $R$  – расстояние между проводниками;  $d\vec{l}$  - бесконечно малый отрезок проводника.

Магнитная индукция поля точечного заряда  $q$ , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью  $\vec{v}$ ,

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v} \cdot \vec{r}]}{r^3},$$

$\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный от заряда к данной точке поля.

Модуль магнитной индукции:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qv}{r^2} \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{v}$  и  $\vec{r}$ .

Сила Лоренца:

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

где  $\vec{F}$  - сила, действующая на заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$ .

Формула Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \cdot \vec{B}],$$

где  $\vec{F}$  - сила, действующая на движущийся заряд  $q$ , если на него действует электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$  и магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ .

Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имеющего  $N$  витков,

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

где  $l$  – длина соленоида.

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через площадку  $dS$  равен:

$$d\hat{O}_A = (\vec{B} \cdot d\vec{S}) = B_n dS.$$

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через произвольную поверхность  $S$ :

$$\hat{O}_A = \int_S (\vec{B} \cdot d\vec{S}) = \int_S B_n dS.$$

Потокоцепление (полный магнитный поток, сцепленный со всеми витками соленоида):

$$\Phi_B = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S,$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле:

$$dA = Id\Phi,$$

$d\Phi$  – магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле:

$$dA = Id\Phi',$$

$d\Phi'$  – изменение магнитного поток, сцепленного с контуром.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Закон Фарадея:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции.

ЭДС индукции, возникающая в рамке площадью  $S$  при вращении рамки с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$\varepsilon_i = BS\omega \sin \omega t,$$

где  $\alpha t$  – мгновенное значение угла между вектором  $\vec{B}$  и вектором нормали  $\vec{n}$  к плоскости рамки.

Магнитный поток, создаваемый током  $I$  в контуре с индуктивностью  $L$ ,

$$\Phi = LI.$$

ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_S = -L \frac{dI}{dt},$$

где  $L$  – индуктивность контура.

Индуктивность соленоида:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l},$$

где  $N$  – число витков соленоида;  $l$  – его длина.

Энергия магнитного поля, создаваемого током в замкнутом контуре, по которому течет ток  $I$ ,

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

Объемная плотность энергии однородного магнитного поля длинного соленоида:

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

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Определить индукцию магнитного поля, создаваемого отрезком прямого провода длиной  $2L$  в точке  $A$ , находящейся в плоскости, перпендикулярной отрезку  $dl = dz$ , и проходящей через его центр, на расстоянии  $a$  от провода. Сила тока, текущего в проводе, равна  $I$

**Решение.**

В данной задаче ток, магнитное поле которого необходимо определить, ограничен в пространстве и расположен симметрично относительно плоскости, указанной в условии. Выберем правую декартову систему координат, у которой ось  $z$

совпадает с проводом, начало с центром провода, ось  $y$  проходит через точку  $A$  (рис. 1).

Рассмотрим произвольный элемент тока  $dl = dz$ , находящийся на расстоянии  $z$  от начала отсчета. Он создает в точке  $A$ , характеризуемой радиус-вектором  $r$ , магнитное поле с индукцией  $d\mathbf{B}$ .

Согласно закону Био-Савара-Лапласа, направление вектора  $d\mathbf{B}$  определяется направлением вектора  $[dl \mathbf{r}]$ , т.е. вектор  $d\mathbf{B}$  направлен на нас перпендикулярно плоскости рисунка (так как в рассматриваемом случае ток течет против направления оси  $Z$  и вектор  $dl$  направлен в ту же сторону). Силовые линии поля, создаваемого таким прямолинейным участком тока, лежат в плоскости, перпендикулярной проводу.

Пусть угол, который составляет некоторый элемент тока с направлением на точку  $A$ , равен  $\alpha$ . Тогда

$$r = \frac{a}{\sin \alpha}; \quad z = a \operatorname{ctg} \alpha; \quad dz = -\frac{a d\alpha}{\sin^2 \alpha}.$$

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа

$$dB = dB_x = \frac{\mu_0 I dz}{4\pi r^2} \sin \alpha = -\frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin \alpha d\alpha.$$

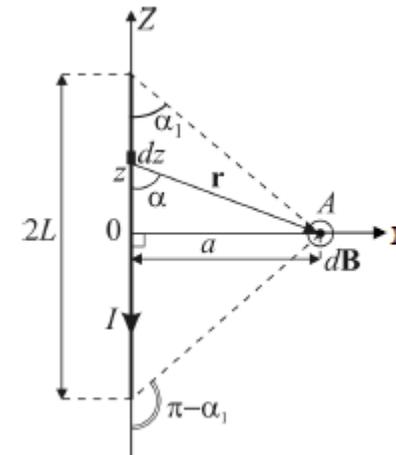


Рис. 1

В силу симметрии задачи для нахождения  $\mathbf{B}$  можно проинтегрировать это выражение по половине провода и удвоить результат:

$$B = B_x = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\pi/2}^{\alpha_1} (-\sin \alpha) d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \cos \alpha_1.$$

Здесь  $\alpha$  – угол, который составляет с направлением на точку  $A$  крайний элемент тока. Так как

$$\cos \alpha_1 = \frac{L}{\sqrt{a^2 + L^2}},$$

окончательно получаем

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \frac{L}{\sqrt{a^2 + L^2}}.$$

**Ответ:** Вектор магнитной индукции лежит в плоскости, перпендикулярной проводу, его модуль равен

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \frac{L}{\sqrt{a^2 + L^2}}.$$

*Замечание 1.* Если плоскость, в которой лежит рассматриваемая точка, перпендикулярна проводу, но не проходит через его середину, то индукция магнитного поля может быть вычислена аналогично:

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

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, которые составляют с направлением на точку расчета крайние элементы тока.

*Замечание 2.* В предельном случае  $a \ll L$  (бесконечный прямой провод) получаем  $B = \mu_0 I / 2\pi a$ .

**Пример 2.** Найти величину и направление вектора магнитной индукции в центре плоского контура, имеющего вид

прямоугольника, если длины его сторон равны соответственно  $b$  и  $c$ , а ток равен  $I$  (рис. 2).

### Решение

Основываясь на решении предыдущей задачи **1**, можно сказать, что векторы индукции магнитного поля, создаваемые всеми сторонами рассматриваемого прямоугольника, в центре контура (точка  $O$  на рис. 2)

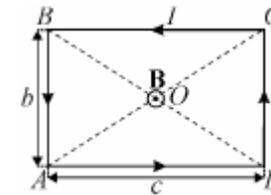


Рис. 2

будут направлены на нас и перпендикулярны к плоскости рисунка. Их величины равны:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi \frac{c}{2}} \frac{b/2}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + \frac{c^2}{4}}}$$

(индукция поля, создаваемого отрезками  $AB$  или  $CD$ )

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi b/2} \frac{c/2}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + \frac{c^2}{4}}}$$

(индукция поля, создаваемого отрезками  $BC$  или  $DA$ ).

По принципу суперпозиции величина индукции магнитного поля в центре контура равна

$$B = 2(B_1 + B_2) = \frac{2\mu_0 I}{\pi bc} \sqrt{b^2 + c^2}.$$

**Ответ:** Вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости контура по правилу правого винта (см. рис. 2) и равен по модулю

$$B = \frac{2\mu_0 I}{\pi bc} \sqrt{b^2 + c^2}.$$

+

**Пример 3.** Определить величину индукции магнитного поля на оси кругового витка радиуса  $R$  с током  $I$  в зависимости от расстояния до его плоскости.

### Решение

Область существования тока ограничена, а распределение тока имеет осевую симметрию.

В силу осевой симметрии задачи и принципа суперпозиции вектор индукции магнитного поля кругового витка на его оси будет направлен вдоль этой оси. Направим ось  $X$  декартовой системы координат вдоль оси витка, начало координат поместим в центр витка. Вектор  $d\mathbf{B}$  индукции поля, создаваемого элементом тока  $I dl$ , перпендикулярен к векторам  $d\mathbf{l}$  и  $\mathbf{r}$  и лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости кольца (Рис. 3)

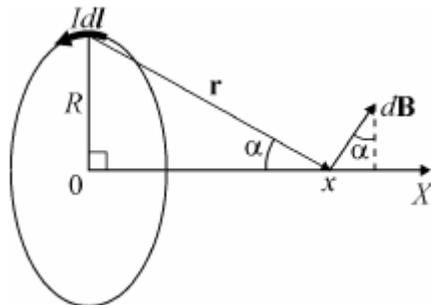


Рис. 3

и проходящей через его диаметр, проведенный через  $d\mathbf{l}$  (рис 3). Проекция вектора  $d\mathbf{B}$  на ось  $X$  по закону Био–Савара–Лапласа равна

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

Отсюда получим

$$B = \frac{\mu_0 I \sin \alpha}{4\pi r^2} 2\pi R = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

**Ответ:**

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

*Замечание 1.* В центре кольца ( $x = 0$ ) поле равно

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

*Замечание 2.* При  $x \gg R$  выражение для индукции магнитного поля на оси витка

$$B \approx \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{x^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I \pi R^2}{x^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2p_m}{x^3}$$

совпадает с выражением для индукции поля магнитного диполя на его оси. В этом случае виток с током можно рассматривать как магнитный диполь и определять магнитное поле такой системы в произвольной точке.

**Задача 4.** Перпендикулярно магнитному полю возбуждено электрическое поле напряженностью 100 кВ/м.

Перпендикулярно обоим полям движется заряженная частица с

постоянной скоростью 100 км/с. Чему равна индукция магнитного поля?

### Решение

Поскольку частица движется равномерно и прямолинейно, то ее ускорение равно нулю. Значит, магнитная сила должна компенсироваться электрической. Так как сила Лоренца направлена перпендикулярно как скорости частицы, так и вектору магнитной индукции, то, в зависимости от направления скорости, она либо параллельна, либо антипараллельна электрической силе. В данном случае реализуется второй вариант. Приравнявая модули сил, получаем уравнение  $qE = qvB$ , откуда находим  $B = E/v = 1$  Тл.

**Ответ:.**  $B = 1$  Тл.

**Пример 5.** Длинный прямой провод, по которому течет ток  $I_0$ , и П-образный проводник  $ABCD$  с подвижной перемычкой  $AB$  длины  $l$  расположены в одной плоскости. Сторона  $CD$  контура расположена на расстоянии  $a$  от проводника. Перемычку перемещают с заданной постоянной скоростью  $v$  (рис.5). Найти:

- 1) ЭДС индукции в контуре как функцию расстояния от перемычки до провода;
- 2) силу тока в контуре, если сопротивление единицы длины всех составляющих его проводников равно  $r'$ , а индуктивностью контура можно пренебречь.

### Решение

#### Нахождение ЭДС индукции

Расчет ЭДС исходя из силы Лоренца.

Магнитная компонента силы Лоренца  $\mathbf{F}$  действует только на

подвижные заряды, находящиеся в движущейся перемычке, и при указанных направлениях векторов  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$  направлена вверх;

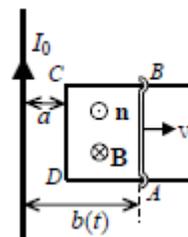


Рис.5

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \oint_{\Gamma} \mathbf{F}_L dl = \int_{AB} [\mathbf{v} \mathbf{B}] dl = \int_{AB} Bv dl = Bv \int_{AB} dl = Bvl = \frac{\mu_0 I_0 l}{2\pi b(t)} v.$$

Интегрирование здесь происходит только по длине перемычки  $AB$ , поскольку остальные проводники неподвижны. Интеграл свелся к умножению, поскольку вектор индукции  $\mathbf{B}$  одинаков во всех точках перемычки.

Этот способ, отражающий физическую причину появления ЭДС, в данном случае наиболее удобен.

#### Нахождение силы тока

Сопротивление контура пропорционально его периметру и равно  $R(t) = r' 2[l + (b(t) - a)]$ . Поскольку индуктивность контура по условию мала, можно пренебречь ЭДС самоиндукции, и сила тока в каждый момент времени определяется по закону Ома из найденной выше ЭДС индукции

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}(t)}{R(t)} = \frac{\mu_0 I_0 l v}{4\pi r' b(l + b - a)}, \text{ где } b(t) = a + vt.$$

Сила тока получилась положительной, то есть его направление совпадает с выбранным положительным направлением обхода контура против часовой стрелки. Создаваемый этим током магнитный поток, очевидно, противоположен по знаку потоку, порождаемому током  $I_0$ , что соответствует правилу Ленца.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 4

$$1) \mathcal{E} = \frac{\mu_0 I_0 l}{2\pi b(t)} v,$$

$$2) I = \frac{\mu_0 I_0 l v}{4\pi r' b(l+b-a)}, \text{ где } b(t) = a + vt.$$

Ответ:

**Пример 6.** Найти индуктивность длинного тонкого цилиндрического соленоида, имеющего  $N$  витков, длину  $l$  и радиус  $a$  ( $l \gg a$ ).

**Решение**

Величина вектора индукции магнитного поля в длинном соленоиде равна  $B = \mu_0 n I$ , где  $n = N/l$  – плотность намотки.

Поскольку магнитное поле однородно, поток вектора  $\mathbf{B}$  через один виток будет равен  $\Phi_1 = BS = \mu_0 n I S$ , где  $S = \pi a^2$  – площадь витка. Полный поток через все  $N$  витков равен

$$\Phi = N\Phi_1 = \mu_0 l N^2 I S / l$$

. Отсюда по определению индуктивности получаем

$$L = \frac{\Phi}{I} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu_0 n^2 V,$$

где  $V = Sl = \pi a^2 l$  – объем соленоида.

**Ответ:**  $L = \mu_0 l N^2 S / l = \mu_0 n^2 V$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения,  $V$  – объем соленоида.

Вариант	Номера задач					
	400	410	420	430	440	450
0	400	410	420	430	440	450
1	401	411	421	431	441	451
2	402	412	422	432	442	452
3	403	413	423	433	443	453
4	404	414	424	434	444	454
5	405	415	425	435	445	455
6	406	416	426	436	446	456
7	407	417	427	437	447	457
8	408	418	428	438	448	458
9	409	419	429	439	449	459

400. По тонкому кольцу радиусом  $R=20$  см течет ток  $I=100$  А. Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  на оси кольца в точке А (рис. 1). Угол  $\beta = 60^\circ$ .

401. По тонкому кольцу течет ток  $I=80$  А. Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке А, равноудаленной от точек кольца на расстояние  $r=10$  см. Угол  $\beta=30^\circ$ .

402. По двум бесконечно длинным проводам, скрещенным под прямым углом, текут токи  $I_1$  и  $I_2=2I_1$  ( $I_1=100$  А). Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке А, равноудаленной от проводов на расстояние  $d=10$  см (рис. 2).

403. По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной, равной 60см, течет постоянный ток  $I=3$ А. Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в центре квадрата.

404. По двум бесконечно длинным параллельным проводам, расстояние между которыми равно 25см, текут токи 20А и 30А в противоположных направлениях. Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке, удаленной на  $r_1=30$ см от первого и  $r_2=40$ см от второго проводника.

405. По бесконечно длинному проводу течёт ток  $I=200$  А. Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  на расстоянии 15см от оси провода.

406. Найти индукцию магнитного поля в центре кругового витка с радиусом 6,4 см, если сила тока равна 12,4 А.

407. Магнитный момент  $p_m$  тонкого проводящего кольца  $p_m=5 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке А, находящейся на оси кольца и удаленной от точек кольца на расстояние  $r=20 \text{ см}$ .

408. По двум бесконечно длинным, прямым параллельным проводам текут одинаковые токи  $I=60 \text{ А}$ . Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке А (рис. 3), равноудаленной от проводов на расстояние  $d=10 \text{ см}$ . Угол  $\beta=60^\circ$ .

409. Бесконечно длинный провод с током  $I=50 \text{ А}$  изогнут так, как это показано на рис. 4. Определите магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке А, лежащей на биссектрисе прямого угла на расстоянии  $d=10 \text{ см}$  от его вершины.

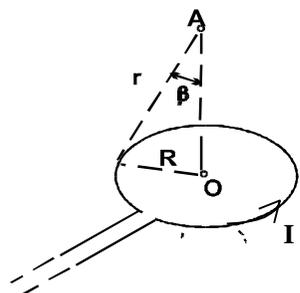


Рис. 1

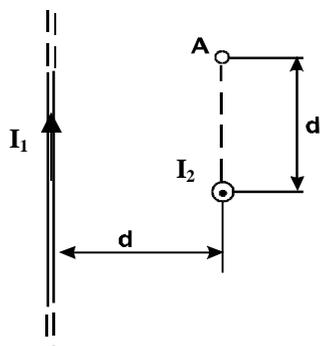


Рис. 2

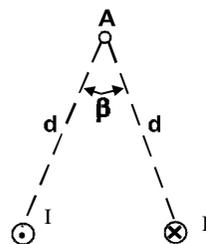


Рис. 3

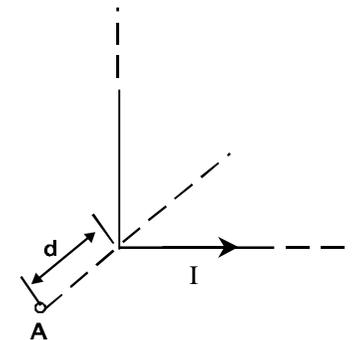


Рис. 4

410. Короткая катушка площадью поперечного сечения  $S=250 \text{ см}^2$ , содержащая  $N=500$  витков провода, по которому течет ток  $I=5 \text{ А}$ , помещена в однородное магнитное поле, напряженностью  $H=1000 \text{ А/м}$ . Найдите: 1) магнитный момент  $p_m$  катушки; 2) вращающий момент  $M$ , действующий на катушку, если ось катушки составляет угол  $\varphi=30^\circ$  с линиями поля.

411. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи  $I=200 \text{ А}$ . Определите силу  $F$ , действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится от него на расстоянии равном ее длине.

412. Тонкий провод длиной  $l=20 \text{ см}$  изогнут в виде полукольца и помещен в магнитное поле ( $B=10 \text{ мТл}$ ) так, что площадь полукольца перпендикулярна линиям магнитной индукции. По проводу пропустили ток  $I=50 \text{ А}$ . Определите силу  $F$ , действующую на провод. Проводящие провода направлены вдоль линий магнитной индукции.

413. Тонкое проводящее кольцо с током  $I=40 \text{ А}$  помещено в однородное магнитное поле ( $B=80 \text{ мТл}$ ). Плоскость кольца перпендикулярна линиям магнитной индукции. Радиус  $R$  кольца равен 20 см. Найдите силу  $F$ , растягивающую кольцо.

414. Квадратная рамка из тонкого провода может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, совпадающей с одной из сторон. Масса  $m$  рамки равна 20 г. Рамку поместили в однородное магнитное поле ( $B=0,1$  Тл), направленное вертикально вверх. Определите угол  $\alpha$ , на который отклонилась рамка от вертикали, когда по ней пропустили ток  $I=10$  А.

415. Из проволоки длиной  $l=20$  см сделаны квадратный и круговой контуры. Найдите вращающие моменты сил  $M_1$  и  $M_2$ , действующие на каждый контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $B=0,1$  Тл. По контурам течет ток  $I=2$  А. Плоскость каждого контура составляет угол  $\alpha=45^\circ$  с направлением магнитной индукции поля.

416. Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на некотором расстоянии друг от друга. По проводникам текут токи в одном направлении. Найти токи  $I_1$  и  $I_2$ , текущие по каждому из проводников, если известно, что для того, чтобы раздвинуть эти проводники на вдвое большее расстояние, пришлось совершить работу (на единицу длины проводников)  $A_l=55$  мкДж/м.

417. По прямому горизонтально расположенному проводу пропускают ток  $I_1=10$  А. Под ним на расстоянии  $R=1,5$  см находится параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток  $I_2=1,5$  А. Определите, какой должна быть площадь поперечного сечения алюминиевого провода, чтобы он удерживался незакрепленным. Плотность алюминия  $\rho=2,7$  г/см<sup>3</sup>.

418. Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле с индукцией  $B=0,1$  Тл. По проводу длиной  $l=1$  м, помещенному перпендикулярно к направлению магнитного поля, течет ток  $I=50$  А. Найдите силу, действующую на провод.

419. Однородное магнитное поле напряженностью 225 А/м действует на помещенный в него проводник длиной 50 см с силой  $10^{-4}$  Н. Определите силу тока в проводнике, если

угол между направлениями тока и индукции магнитного поля равен  $45^\circ$ .

420. Ион с кинетической энергией 1 кэВ попал в однородное магнитное поле ( $B=21$  мТл) и стал двигаться по окружности. Определите магнитный момент  $p_m$  эквивалентного кругового тока.

421. Протон прошел ускоряющую разность потенциалов  $U=300$  В и влетел в однородное магнитное поле ( $B=20$  мТл) под углом  $30^\circ$  к линиям магнитной индукции. Определите шаг  $h$  и радиус  $R$  винтовой линии, по которой будет двигаться протон в магнитном поле.

422. Ион, попав в магнитное поле ( $B=0,01$  Тл), стал двигаться по окружности. Определите кинетическую энергию иона (в эВ), если магнитный момент  $p_m$  эквивалентного кругового тока равен  $1,6 \cdot 10^{-14}$  Ам<sup>2</sup>.

423. Два иона разных масс с одинаковыми зарядами влетели в однородное магнитное поле, стали двигаться по окружностям радиусами  $R_1=3$  см и  $R_2=1,73$  см. Определите отношение масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

424. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией  $B=1$  мТл. Определите радиус этой окружности, если до вхождения в магнитное поле он был ускорен разностью потенциалов  $U=1$  кВ.

425. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией  $B=1$  мТл. Определите угловую скорость вращения электрона.

426. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U=200$  В, движется параллельно прямолинейному проводу на расстоянии  $a=5$  мм от него. Какая сила действует на электрон, если по проводнику пропустить ток  $I=10$  А?

427. Электрон, обладая скоростью  $v=10$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля  $B=0,1$  мТл. Определите нормальное и тангенциальное ускорения электрона.

428. Найдите кинетическую энергию  $W$  (в эВ) протона, движущегося по дуге окружности радиусом  $R=60$  см в магнитном поле с индукцией  $B=1$  Тл.

429. Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают перпендикулярно индукции однородного магнитного поля. Во сколько раз радиус кривизны  $R_1$  траектории протона больше радиуса кривизны  $R_2$  траектории электрона?

430. Однородные магнитное ( $B=2,5$  мТл), и электрическое ( $E=10$  кВ/м) поля скрещены под прямым углом. Электрон, скорость  $v$  которого равна  $4 \cdot 10^6$  м/с, влетает в эти поля так, что силы, действующие на него со стороны магнитного и электрического полей, сонаправлены. Определите ускорение электрона.

431. Однозарядный ион лития относительной атомной массы  $7 \cdot 10^{-3}$  кг/моль прошел ускоряющую разность потенциалов  $U=300$  В и влетел в скрещенные под прямым углом однородные магнитное и электрическое поля. Определите магнитную индукцию поля, если траектория иона в скрещенных полях прямолинейна. Напряженность электрического поля равна  $2$  кВ/м.

432. Альфа-частица, имеющая скорость  $v=2$  Мм/с, влетает под углом  $30^\circ$  к сонаправленным магнитному ( $B=1$  мТл) и электрическому ( $E=1$  кВ/м) полям. Определите ускорение альфа-частицы.

433. Магнитное ( $B=2$  мТл) и электрическое ( $E=1,6$  кВ/м) поля сонаправлены. Перпендикулярно векторам  $B$  и  $E$  влетает электрон со скоростью  $v=0,8$  Мм/с. Определите ускорение электрона

434. В скрещенные под прямым углом однородные магнитное ( $H=1$  МА/м) и электрическое ( $E=50$  кВ/м) поля влетел ион. При какой скорости  $v$  иона (по модулю и направлению) он будет двигаться в скрещенных полях и прямолинейно?

435. Протон прошел некоторую ускоряющую разность потенциалов  $U$  и влетел в скрещенные под прямым углом однородные поля: магнитное ( $B=5$  мТл) и электрическое ( $E=20$  кВ/м). Определите разность потенциалов  $U$ , если протон в скрещенных полях движется прямолинейно.

436. Протон влетел в скрещенные под углом  $\alpha=120^\circ$  магнитное ( $B=50$  мТл) и электрическое ( $E=20$  кВ/м) поля. Определите ускорение  $a$  протона, если его скорость ( $v=410^5$  м/с) перпендикулярна векторам  $E$  и  $B$ .

437. Альфа-частица влетела в скрещенные под прямым углом магнитное ( $B=5$  мТл) и электрическое ( $E=30$  кВ/м) поля. Определите ускорение альфа-частицы, если ее скорость ( $v=210^6$  м/с) перпендикулярна векторам  $E$  и  $B$ , причем силы, действующие со стороны этих полей, противоположны по направлению.

438. Ион, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U=645$  В, влетел в скрещенные под прямым углом однородные поля: магнитное ( $B=1,5$  мТл) и электрическое ( $E=200$  В/м). Определите отношение заряда иона к его массе, если ион в этих полях движется прямолинейно.

439. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U=1,2$  кВ, попал в скрещенные под прямым углом однородное магнитное и электрическое поля. Определите напряженность электрического поля. Магнитная индукция  $B=6$  мТл, а траектория электрона – прямая.

440. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен плоский контур площадью  $S=100$  м<sup>2</sup>. Поддерживая в контуре постоянную силу тока  $I$  А, его переместили из поля в область пространства, где поле отсутствует. Определите магнитную индукцию  $B$  поля, если при перемещении контура была совершена работа  $A=0,4$  Дж.

441. Квадратный контур со стороной  $a=0,2$  м, в котором течет ток  $I=6$  А, находится в магнитном поле ( $B=0,8$  Тл) под углом  $\alpha=45^\circ$  к линиям индукции. Какую работу  $A$  нужно

совершить, чтобы при неизменной силе тока в контуре изменить его форму на окружность?

442. На длинный картонный каркас диаметром  $d=5$  см намотана однослойная обмотка (виток к витку) из проволоки диаметром  $d=0,2$  мм. Определите магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый таким соленоидом при силе тока  $I=0,5$  А.

443. Плоский контур с током  $I=5$  А свободно установился в однородном магнитном поле ( $B=0,4$  Тл). Площадь контура  $S=200$  м<sup>2</sup>. Поддерживая ток в контуре неизменным, его повернули относительно оси, лежащей в плоскости контура, на угол  $\alpha=40^\circ$ . Определите совершенную при этом работу  $A$ .

444. Плоский контур площадью  $S=20$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле ( $B=0,03$  Тл). Определите магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, если плоскость его составляет угол  $\varphi=60^\circ$  с направлением линий индукции.

445. Магнитный поток  $\Phi$  сквозь сечение соленоида равен 50 мкВб. Длина соленоида  $l=50$  см. Найдите магнитный момент  $p_m$  соленоида, если его витки плотно прилегают друг к другу.

446. В магнитном поле с индукцией 0,1 Тл расположен стержень длиной 1 м, который вращается перпендикулярно к направлению линий магнитной индукции. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определите поток магнитной индукции сквозь поверхность, которую образует стержень при каждом обороте.

447. Магнитный поток через контур из проволоки с электрическим сопротивлением 2 Ом равномерно уменьшился от  $3 \cdot 10^{-4}$  Вб до 0. Какой заряд при этом прошел через поперечное сечение проводника?

448. Кольцо радиуса  $r=1$  м и сопротивлением  $R=3,14$  Ом помещено в однородное магнитное поле с индукцией  $B=0,1$  Тл. Плоскость кольца перпендикулярна вектору индукции поля. Какой заряд пройдет через поперечное сечение кольца при исчезновении поля?

449. Виток, в котором поддерживается постоянная сила тока  $I=30$  А, свободно установился в однородном магнитном

поле ( $B=20$  мТл). Диаметр витка  $d=10$  см. Какую работу  $A$  нужно совершить для того, чтобы повернуть виток относительно оси, совпадающей с диаметром, на угол  $\alpha=\pi/6$ ?

450. Две длинные катушки намотаны на общий сердечник, причем индуктивности этих катушек  $L_1=0,64$  Гн и  $L_2=0,04$  Гн. Определите, во сколько раз число витков первой катушки больше, чем второй.

451. Определите, сколько витков проволоки, вплотную прилегающих друг к другу, диаметром  $d=0,5$  мм с изоляцией ничтожной толщины надо намотать на картонный цилиндр диаметром  $D=1,5$  см, чтобы получить однослойную катушку индуктивностью  $L=100$  мкГн.

452. Сверхпроводящий соленоид длиной  $l=10$  см и площадью поперечного сечения  $S=3$  см<sup>2</sup>, содержащий  $N=1000$  витков, может быть подключен к источнику ЭДС  $\varepsilon=12$  В. Определите силу тока через 0,01 с после замыкания ключа.

453. На концах крыльев самолета размахом 15 м, летящего со скоростью 900 км/ч, возникает ЭДС индукции 0,15 В. Определите вертикальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

454. Катушка из 100 витков площадью 15 см<sup>2</sup> вращается с частотой 5 Гц в однородном магнитном поле индукцией 0,2 Тл. Ось вращения перпендикулярна оси катушки и линиям индукции поля. Определите максимальную ЭДС индукции в катушке.

455. В плоскости, перпендикулярной однородному магнитному полю напряженностью  $10^5$  А/м, вращается стержень длиной 0,8 м относительно оси, проходящей через его середину. В стержне индуцируется ЭДС, равная 0,1 В. Определите угловую скорость вращения стержня.

456. Однослойный соленоид без сердечника длиной 20 см и диаметром 0,1 мм. За 0,1 с сила тока в нем равномерно убывает с 5 А до 0. Определите ЭДС индукции в соленоиде.

457. Перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля индукцией 0,3 Тл движется проводник длиной 15 см со скоростью 10 м/с, перпендикулярной проводнику. Определите ЭДС, индуцируемую в проводнике.

458. В магнитном поле, индукция которого 0,05 Тл, вращается стержень длиной  $l=1$  м с угловой скоростью  $\omega=20$  рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна вектору магнитной индукции поля. Найдите ЭДС индукции, возникающую на концах стержня.

459. Скорость самолета с реактивным двигателем 950 км/ч. Найдите ЭДС индукции, возникающую на концах крыльев такого самолета, если вертикальная составляющая напряженности земного магнитного поля 39,8 А/м и размах крыльев самолета 12,5 м.

Контрольная работа №5

## ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

### ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Скорость света в среде:

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

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $n$  – абсолютный показатель преломления среды.

Разность фаз двух когерентных волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0}(L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta,$$

где  $L=sn$  – оптическая длина пути ( $s$  – геометрическая длина пути световой волны в среде;  $n$  – показатель преломления этой

среды);  $\Delta=L_2-L_1$  – оптическая разность хода двух световых волн;  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме.

Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m=0, 1, 2, \dots).$$

Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm (2m+1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots).$$

Ширина интерференционной полосы

$$\Delta x = \frac{l}{d}\lambda_0,$$

где  $d$  – расстояние между двумя когерентными источниками, находящимися на расстоянии  $l$  от экрана, параллельного обоим источникам, при условии  $l \gg d$ .

Условия максимумов и минимумов при интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей тонкой плоскопараллельной пленки, находящейся в воздухе ( $n_0=1$ ),

$$2dn \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0$$

$$(m=0, 1, 2, \dots),$$

$$2dn \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2}$$

$$(m=0, 1, 2, \dots),$$

где  $d$  – толщина пленки;  $n$  – ее показатель преломления;  $i$  – угол падения;  $r$  – угол преломления. В общем случае член  $\pm \lambda_0/2$  обусловлен потерей полуволны при отражении света от границы раздела: если  $n > n_0$ , то необходимо применять знак плюс, если  $n < n_0$  – знак минус.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{(m - \frac{1}{2})\lambda_0 R} \quad (m=1, 2, 3, \dots),$$

где  $m$  – номер кольца;  $R$  – радиус кривизны линзы.

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете):

$$r_m = \sqrt{m\lambda_0 R} \quad (m=0, 1, 2, 3, \dots).$$

## ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Радиус внешней границы  $m$ -й зоны Френеля для сферической волны:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda},$$

где  $m$  – номер зоны Френеля;  $\lambda$  – длина волны,  $a$  и  $b$  – расстояния диафрагмы с круглым отверстием соответственно от точечного источника и от экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

Условия дифракционных максимумов и минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:

$$a \sin \varphi = \pm(2m + 1) \frac{\lambda}{2};$$

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2};$$

$$(m=1, 2, 3, \dots),$$

где  $a$  – ширина щели;  $\varphi$  – угол дифракции;  $m$  – порядок спектра,  $\lambda$  – длина волны.

Условия главных максимумов и дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально;

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots);$$

$$d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N} \quad (m=0, 1, 2, \dots, \text{кроме } 0, N, 2N, \dots),$$

где  $d$  – период дифракционной решетки;  $N$  – число штрихов решетки.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Степень поляризации света:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$   $I_{\min}$  – соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Закон Малюса:

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

где  $I$  – интенсивность плоско поляризованного света, прошедшего через анализатор;  $I_0$  – интенсивность плоско поляризованного света, падающего на анализатор;  $\alpha$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера:

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

где  $i_B$  – угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоско поляризованным;  $n_{21}$  – относительный показатель преломления.

## КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Закон Стефана-Больцмана:

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

где  $R_e$  – энергетическая светимость (излучательность) черного тела;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

Связь энергетической светимости  $R_e$  и спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\nu, T}$   $r_{\lambda, T}$  черного тела:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda$$

Энергетическая светимость серого тела:

$$R_T^C = A_T \sigma T^4,$$

где  $A_T$  – поглощательная способность серого тела.

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

где  $\lambda_{max}$  – длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела;  $b$  – постоянная Вина.

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры:

$$(r_{\lambda, T})_{max} = CT^5,$$

где  $C = 1,3 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м<sup>3</sup>·К<sup>5</sup>)

Энергия кванта:

$$\varepsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$h$  – постоянная Планка.

Связь радиационной  $T_p$  и истинной  $T$  температур:

$$T_p = \sqrt[4]{A_T T},$$

где  $A_T$  – поглощательная способность серого тела.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\varepsilon = h\nu = A + T_{max},$$

где  $\varepsilon = h\nu$  – энергия фотона, падающего на поверхность металла;  $A$  – работа выхода электрона из металла;  $T_{max}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Красная граница фотоэффекта для данного металла:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}; \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где  $\lambda_0$  – максимальная длина волны излучения ( $\nu_0$  – соответственно минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен.

Импульс фотона:

$$p_\gamma = \frac{h\nu}{c}.$$

Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

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

где  $E_e = Nh\nu$  – облученность поверхности (энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени);  $\rho$  – коэффициент отражения;  $\omega$  – объемная плотность энергии излучения.

### Примеры решения задач

**Задача 1.** Поверхности стеклянного клина образуют между собой угол  $0,2'$ . На клин нормально падает пучок лучей монохроматического света с длиной волны 550 нм. Определить ширину интерференционной полосы. Показатель преломления стекла принять равным 1,5.

#### Решение

Выделим из всей совокупности лучей, падающих на поверхность клина, лучи 1 и 2, расстояние между которыми равно ширине интерференционной полосы  $\Delta x$  (рис. 1). Допустим, что в точках падения лучей 1 и 2 наблюдаются светлые полосы (интерференционные максимумы). Обозначим толщину пленки в месте падения первого луча  $h_1$ , второго –  $h_2$ . Оптическая разность хода когерентных лучей, образованных при отражении луча 1 от верхней и от нижней поверхностей пленки, согласно теории и с учетом потери полуволны, равна

$$2h_1n + \lambda_0/2 = k\lambda_0. \quad (1)$$

Аналогично для луча 2

$$2h_2n + \lambda_0/2 = (k + 1)\lambda_0 \quad (2)$$

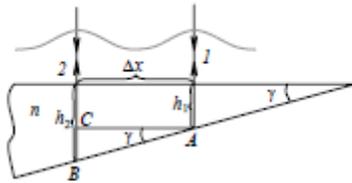


Рис1

Вычитая (1) из (2), получим:

$$2(h_2 - h_1)n = \lambda_0. \quad (3)$$

Из треугольника  $ABC$  выразим разность расстояний  $h_2 - h_1 = \Delta x \operatorname{tg} \gamma$ .

Ввиду малости угла  $h_2 - h_1 = \Delta x \gamma$  (где  $\gamma$  выражен в рад). Тогда уравнение (3) принимает вид:

$$2\Delta x \gamma n = \lambda_0, \quad (4)$$

откуда ширина интерференционной полосы равна

$$\Delta x = \lambda_0 / 2\gamma n = 3,2 \text{ мм}$$

**Ответ:** 3,2 мм.

**Задача 2.** На дифракционную решетку падает нормально белый свет. Линза, помещенная вблизи решетки, проектирует спектр на экран, отстоящий от линзы на 3 м. Ширина спектра первого порядка 66 см. Определить постоянную решетки. Границы видимого света  $\lambda_{кр} = 770$  нм,  $\lambda_{ф} = 380$  нм.

**Решение**

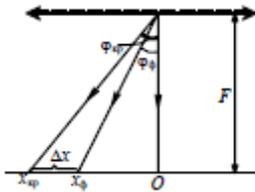


Рис.2

На рис. 2  $\phi_{\text{ф}}$  – угол дифракции, соответствующий углу отклонения от первоначального направления фиолетовых лучей,  $\phi_{\text{кр}}$  – красных лучей,  $x_{\text{ф}}$  – расстояние от центрального максимума до фиолетовой линии первого порядка,  $x_{\text{кр}}$  – до красной линии;  $\Delta x$  – ширина спектра первого порядка.

Из условия главных максимумов следует, что  $\sin j = k\lambda/d$ ; считая углы дифракции первого порядка малыми, можно принять  $\sin \phi \approx \operatorname{tg} \phi$ . Тогда  $\operatorname{tg} \phi = k\lambda/d$ . (1)

Из рис. 2 видно, что  $x_{\text{ф}} = F \operatorname{tg} \phi_{\text{ф}}$ ,

$x_{\text{кр}} = F \operatorname{tg} \phi_{\text{кр}}$ , тогда

$$\Delta x = x_{\text{кр}} - x_{\text{ф}} = F(\operatorname{tg} \phi_{\text{кр}} - \operatorname{tg} \phi_{\text{ф}}). \quad (2)$$

Подставим (1) в (2), получим:  $\Delta x = F(k\lambda_{\text{кр}}/d - k\lambda_{\text{ф}}/d)$

Откуда  $d = F(k\lambda_{\text{кр}}/d - k\lambda_{\text{ф}}/d) / \Delta x$

Подставляем числовые значения:

$$d = 18 \text{ мкм.}$$

**Ответ:**  $d = 18$  мкм.

**Задача 3.** На пути частично поляризованного света поместили поляризатор. При повороте поляризатора на угол  $\alpha = 60^\circ$  из положения, соответствующего максимуму пропускания, интенсивность прошедшего света уменьшилась в  $\eta = 3,0$  раза. Найти степень поляризации падающего света.

**Решение**

В частично поляризованном луче можно условно выделить две составляющие: одна – поляризованный свет, в котором колебания вектора  $\mathbf{E}$  происходят в строго определенном направлении, и вторая составляющая, в которой световые колебания совершаются во всевозможных направлениях, как в естественном свете.

Интенсивность света первой составляющей обозначим как  $I$ , второй – как  $I_0$ . Максимум пропускания соответствует случаю, когда направление колебаний вектора  $\mathbf{E}$  поляризованного света параллельно плоскости пропускания поляризатора.

Тогда поляризатор полностью пропустит первую составляющую падающего света и половину интенсивности второй составляющей:

$$I_{\text{П1}} = I + 1/2 I_0. \quad (1)$$

При повороте поляризатора из этого положения на угол  $\alpha$ , интенсивность пропущенного поляризованного света определится по закону Малюса, а интенсивность пропущенной второй составляющей не зависит от угла поворота поляризатора и будет равна, как и в первом случае,  $1/2 I_0$ , то есть

$$I_{P2} = I \cos^2 \alpha + 1/2 I_0. \quad (2)$$

По условию задачи  $I_{P1}/I_{P2} = \eta$ , т.е.  $I_{P1} = \eta I_{P2}$ . (3)

Подставим соотношения (1) и (2) в (3):

$$I + 1/2 I_0 = \eta(I \cos^2 \alpha + 1/2 I_0),$$

откуда после преобразований и подстановки числовых данных имеем:

$$I = 4I_0.$$

Степень поляризации частично поляризованного света определяется формулой

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$$

где максимальная интенсивность

$$I_{\max} = I_{P1} = 4I_0 + 1/2 I_0 = 4,5I_0.$$

Минимальная интенсивность соответствует случаю, когда поляризатор не пропустит поляризованный свет; через него пройдет только половина второй составляющей частично поляризованного света  $I_{\min} = 1/2 I_0$ .

Тогда степень поляризации света равна:

$$P = (4,5 I_0 - 0,5 I_0) / (4,5 I_0 + 0,5 I_0) = 0,80$$

**Ответ:**  $P = 80\%$ .

**Задача 4.** Найдите температуру  $T$  печи, если известно, что излучение из отверстия в ней площадью  $S = 6,1 \text{ см}^2$  имеет мощность  $N = 34,6 \text{ Вт}$ . Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

**Решение**

Закон Стефана-Больцмана:

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

$R_e$  - энергетическая светимость черного тела, т.е. энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности

абсолютно черного тела,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ,  $T$  - термодинамическая температура.

По условию задачи

$$N = R_e S = \sigma T^4 S.$$

Следовательно,  $T^4 = N / \sigma S$

После подстановки получаем:  $T = 10^3 \text{ К}$

**Ответ:**  $T = 10^3 \text{ К}$

**Задача 5.** Температура абсолютно черного тела  $T = 2 \text{ кК}$ . Определите длину волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости  $(r_{\lambda, T})_{\max}$  для этой длины волны.

**Решение**

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где  $\lambda_{\max}$  - длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела;  $b$  - постоянная Вина, равная  $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м К}$ .

Определяем  $\lambda_{\max} = 2,9 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 10^3 = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры определяется как:

$$(r_{\lambda, T})_{\max} = C T^5,$$

где  $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К}^5)$

$$(r_{\lambda, T})_{\max} = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot 32 \cdot 10^{15} = 41,6 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3$$

**Ответ:**  $\lambda_{\max} = 2,9 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 10^3 = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,

$$(r\lambda, \tau)_{max} = 1,3 \cdot 10^{-5} 32 \cdot 10^{15} = 41,6 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3$$

**Задача 6.** На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U=1,5 \text{ В}$ . Определите длину волны  $\lambda$  света, падающего на пластину.

**Решение**

: Работа на преодоление сил электрического поля равна значению максимальной кинетической энергии фотозлектрона

$$eU = mV_{max}^2/2 = Ek_{max}$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\varepsilon = h\nu = A + Ek_{max}$$

где  $\varepsilon = h\nu$  - энергия фотона, падающего на поверхность металла;  $A$  - работа выхода электрона из металла;  $Ek_{max}$  - максимальная кинетическая энергия фотозлектрона.  $A$ -работа выхода электронов из цинка -табличная величина, равная  $6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

Определяем  $\lambda$

$$\text{Из уравнения Эйнштейна } \nu = (A + Ek_{max})/h,$$

$$\lambda = c/\nu = ch/(A + eU),$$

где  $c$  - скорость распространения электромагнитной волны в среде, равная  $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

$$\lambda = 3 \cdot 10^8 \cdot 6,6 \cdot 10^{-34} / (6,4 \cdot 10^{-19} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5) = 1,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

**Ответ:**  $\lambda = 1,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

**Задача 6.** Давление  $p$  света с длиной волны  $\lambda = 40 \text{ нм}$ , падающего нормально на черную поверхность, равно  $2 \text{ нПа}$ . Определите число  $N$  фотонов, падающих за время  $t = 10 \text{ с}$  на площадь  $S = 1 \text{ мм}^2$  этой поверхности.

**Решение**

Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$P = N h \nu (1 + \rho) / c$$

где  $N h \nu$ - энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени;  $\rho$  - коэффициент отражения;  $c$ - скорость света.

По условию задачи свет падает на абсолютно черное тело, следовательно,  $\rho = 0$ .

$$\nu = c/\lambda.$$

$N = P \lambda / h$  число фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени.

За  $10 \text{ с}$  на поверхность  $1 \text{ мм}^2$  падает число фотонов, равное

$$N = P \lambda t S / h$$

$$N = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 40 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^{-6} / (6,6 \cdot 10^{-34}) = 12 \cdot 10^{11} \text{ фотонов.}$$

**Ответ:**  $N = 12 \cdot 10^{11} \text{ фотонов}$

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 5

Вариант	Номера задач					
0	500	510	520	530	540	550
1	501	511	521	531	541	551
2	502	512	522	532	542	552
3	503	513	523	533	543	553
4	504	514	524	534	544	554
5	505	515	525	535	545	555
6	506	516	526	536	546	556
7	507	517	527	537	547	557
8	508	518	528	538	548	558
9	509	519	529	539	549	559

500. На стеклянную пластинку положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом длиной волны  $\lambda=500$  нм. Найдите радиус  $R$  линзы, если радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете  $r_4=2$  мм.

501. Между двумя тонкими плоскопараллельными пластинами на расстоянии  $L=10$  см от границы их соприкосновения находится проволока диаметром  $d=0,01$  мм, образуя воздушный клин. Пластины освещаются нормально падающим монохроматическим светом ( $\lambda=0,6$  мкм). Определите ширину интерференционных полос, наблюдаемых в отраженном свете.

502. На тонкий стеклянный клин падает нормально параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda=500$  нм. Расстояние между соседними темными интерференционными полосами в отраженном свете  $b=0,5$  мм. Определите угол между поверхностями клина. Показатель преломления стекла, из которого изготовлен клин  $n=1,6$ .

503. На тонкую глицериновую пленку толщиной  $d=1,5$  мкм нормально к поверхности падает белый свет. Определите длины волн  $\gamma$ -лучей видимого участка спектра

( $0,4<\lambda<0,8$  мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции.

504. На стеклянную пластинку нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления  $n=1,3$ . Пластинка освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны  $\lambda=640$  нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину  $d_{min}$  должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость?

505. Плосковыпуклая стеклянная линза с  $R=1$  м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете  $r_5=1,1$  мм. Определите длину световой волны  $\lambda$ ?

506. Расстояние  $L$  от щели до экрана в опыте Юнга равно 1 м. Определите расстояние между щелями, если на отрезке длиной  $\ell=1$  см укладывается  $N=10$  темных интерференционных полос, длина волны падающего света  $\lambda=0,7$  мкм.

507. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найдите показатель преломления жидкости, если радиус третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны  $\lambda=0,6$  мкм равен 0,82 мм. Радиус кривизны линзы  $R=0,5$  м.

508. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ( $\lambda=590$  нм). Радиус кривизны  $R$  линзы равен 5 см. Определите толщину воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье светлое кольцо.

509. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=500$  нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определите толщину пленки, если показатель преломления материала пленки  $n=1,4$ .

510. Точечный источник света ( $\lambda=0,5$  мкм) расположен на расстоянии  $a=1$  м перед диафрагмой с круглым отверстием диаметра  $d=2$  мм. Определите расстояние от диафрагмы до точки наблюдения, если отверстие открывает три зоны Френеля.

511. Определите радиус третьей зоны Френеля, если расстояния от точечного источника света ( $\lambda=0,5$  мкм) до волновой поверхности и от волновой поверхности до точки наблюдения равны 2 м.

512. Определите радиус пятой зоны Френеля, если радиус второй зоны Френеля для плоского волнового фронта равен 2 мм.

513. На зонную пластинку падает плоская монохроматическая волна ( $\lambda=0,5$  мкм). Определите радиус первой зоны Френеля, если расстояние от зонной пластинки до места наблюдения 1 м.

514. На щель шириной 0,1 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=0,6$  мкм. Экран, на котором наблюдается дифракционная картина, расположен параллельно щели на расстоянии 1 м. Определите расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от центрального фраунгоферова максимума.

515. На щель шириной  $5\lambda$  падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ . Под каким углом будет наблюдаться второй дифракционный минимум света?

516. Свет от монохроматического источника ( $\lambda=600$  нм) падает нормально на диафрагму с диаметром отверстия 6 мм. За диафрагмой на расстоянии 3 м от нее находится экран. Какое число зон Френеля укладывается в отверстие диафрагмы? Каким будет центр дифракционной картины на экране: темным или светлым?

517. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии  $l$  от точечного источника монохроматического света ( $\lambda=600$  нм).

На расстоянии 0,51 м от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром  $D=1$  см. Найдите расстояние, если преграда закрывает только центральную зону Френеля.

518. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Его направление на четвертую темную дифракционную полосу составляет  $2^{\circ}12'$ . Определите, сколько длин волн укладывается на ширине щели.

519. На экран с круглым отверстием радиусом  $r=2$  мм нормально падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 500 нм. Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии 1,5 м от него. Определите число зон Френеля, укладывающихся в отверстие. Какое кольцо (темное или светлое) наблюдается на экране в центре дифракционной картины.

520. Угол падения  $\alpha$  луча на поверхность стекла равен  $60^{\circ}$ . При этом отраженный пучок света оказался максимально поляризованным. Определите угол  $\alpha'$  преломления луча.

521. Пучок света, идущий в стеклянном сосуде с глицерином, отражается от дна сосуда. При каком угле  $\alpha$  падения отраженный пучок света максимально поляризован?

522. Пучок света последовательно проходит через два николя, плоскости пропускания которых образуют между собой угол  $\varphi=40^{\circ}$ . Принимая, что коэффициент поглощения каждого николя равен 0,15, найдите, во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый николь.

523. Пучок света переходит из жидкости в стекло. Угол падения  $\alpha$  пучка равен  $60^{\circ}$ , угол преломления  $\alpha' = 50^{\circ}$ . При каком угле падения  $\alpha_n$  пучок света, отраженный от границы раздела этих сред, будет максимально поляризован?

524. Пучок света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку, нижняя поверхность которой находится в воде. При каком угле падения  $\alpha_n$  свет, отраженный от границы стекло - вода, будет максимально поляризован?

525. Параллельный пучок света переходит из глицерина в стекло так, что пучок, отраженный от границы раздела этих сред, оказывается максимально поляризованным. Определите угол  $\varphi$  между падающим и преломленным пучками.

526. Определите степень поляризации частично поляризованного света, если амплитуда светового вектора, соответствующая максимально интенсивности света, в 3 раза больше амплитуды, соответствующей его минимальной интенсивности.

527. Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0,75. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной.

528. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет  $30^\circ$ . Определите изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен  $45^\circ$ .

529. Определите показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления  $35^\circ$ .

530. Найдите температуру  $T$  печи, если известно, что излучение из отверстия в ней площадью  $S=6,1 \text{ см}^2$  имеет мощность  $N=34,6 \text{ Вт}$ . Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

531. При нагревании абсолютно черного тела длина волны  $\lambda$ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от 690 до 500 нм. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость тела?

532. Мощность излучения абсолютно черного тела  $N=10 \text{ кВт}$ . Найдите площадь  $S$  излучающей поверхности тела, если максимум спектральной плотности его энергетической светимости приходится на длину волны  $\lambda=700 \text{ нм}$ .

533. Определите поглощательную способность  $a_r$  серого тела, для которого температура, измеренная радиационным

пирометром,  $T_{рад}=1400 \text{ К}$ , тогда как истинная температура  $T$  тела равна 3200 К.

534. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{m1}=780 \text{ нм}$ ) на фиолетовую ( $\lambda_{m2}=390 \text{ нм}$ )?

535. Средняя энергетическая светимость  $R$  поверхности Земли равна  $0,54 \text{ Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ . Какова должна быть температура  $T$  поверхности Земли, если условно считать, что она излучает как серое тело с коэффициентом черноты  $a_r=0,25$ ?

536. Из смотрового окошечка печи излучается поток  $\Phi_e=4 \text{ кДж}/\text{мин}$ . Определите температуру  $T$  печи, если площадь окошечка  $S=8 \text{ см}^2$ .

537. Температура абсолютно черного тела  $T=2 \text{ кК}$ . Определите длину волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости  $(r_{\lambda,T})_{max}$  для этой длины волны.

538. Определите температуру  $T$  и энергетическую светимость  $R_e$  абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_m=600 \text{ нм}$ .

539. Определите, как и во сколько раз изменится мощность излучения черного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с  $\lambda_1=720 \text{ нм}$  до  $\lambda_2=400 \text{ нм}$ .

540. Какова должна быть длина волны  $\gamma$ -излучения, падающего на платиновую пластинку, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была  $v_{max}=3 \text{ Мм}/\text{с}$ ?

541. На металлическую пластинку направлен пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda=0,25 \text{ мкм}$ ). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов  $v_{min}=0,96 \text{ В}$ . Определите работу выхода  $A$  электронов из металла.

542. Найдите задерживающую разность потенциалов  $U$  для электронов, вырываемых при освещении калия светом длиной волны  $\lambda=340$  нм.

543. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=0,1$  мкм. Красная граница фотоэффекта  $\lambda_0=0,3$  мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

544. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки составляет 3,7 В. Работа выхода 6,3 эВ. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определите работу выхода электронов из этой пластинки.

545. Красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_0=310$  нм. Определите максимальную кинетическую энергию  $T_{max}$  фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падает свет с длиной волны  $\lambda=200$  нм.

546. На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U=1,5$  В. Определите длину волны  $\lambda$  света, падающего на пластину.

547. На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны  $\lambda=200$  нм. Найдите наименьшее значение задерживающей разности потенциалов  $U_{min}$ , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить поток.

548. На поверхность калия падает свет с длиной волны  $\lambda=150$  нм. Определите максимальную кинетическую энергию  $T_{max}$  фотоэлектронов.

549. Найдите частоту света, вырывающего из металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов  $U=3$  В. Фотоэффект прекращается при частоте света  $\nu_0=610^{14}$  Гц. Какова работа выхода электрона из металла?

550. Свет с длиной волны  $\lambda=600$  нм нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление

$p=4$  мкПа. Определите число  $N$  фотонов, падающих за время  $t=10$  с на площадь  $S=1$  мм<sup>2</sup> этой поверхности.

551. Монохроматический пучок света ( $\lambda=0,49$  мкм), падая по нормали к поверхности, производит световое давление  $P=4,9$  мкПа. Какое число фотонов  $I$  падает в единицу времени на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света  $\rho=0,25$ .

552. Давление монохроматического света с длиной волны  $\lambda=500$  нм на зачерненную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно 0,12 мкПа. Определите число фотонов, падающих каждую секунду на 1 м<sup>2</sup> поверхности.

553. Давление света, производимое на зеркальную поверхность  $p=5$  мПа. Определите концентрацию  $n_0$  фотонов вблизи поверхности, если длина волны света, падающего на поверхность  $\lambda=0,5$  мкм.

554. Определите энергетическую освещенность (облученность)  $E_e$  зеркальной поверхности, если давление  $p$ , производимое излучением, равно 40 мкПа. Излучение падает нормально к поверхности.

555. Определите коэффициент отражения  $\rho$  поверхности, если при энергетической освещенности  $E_e=120$  Вт/м<sup>2</sup> давление света на нее оказалось равным 0,5 мкПа.

556. Давление  $p$  света с длиной волны  $\lambda=40$  нм, падающего нормально на черную поверхность, равно 2 нПа. Определите число  $N$  фотонов, падающих за время  $t=10$  с на площадь  $S=1$  мм<sup>2</sup> этой поверхности.

557. На идеально отражающую плоскую поверхность нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=0,55$  мкм. Поток излучения  $\Phi_e$  составляет 0,45 Вт. Определите: 1) число фотонов, падающих на поверхность за время  $t=3$  с; 2) силу давления, испытываемую этой поверхностью.

558. На идеально отражающую поверхность площадью  $S=5$  см<sup>2</sup> за время  $t=3$  мин нормально падает монохроматический

свет, энергия которого  $W=9$  Дж. Определите, облученность поверхности.

559. На идеально отражающую поверхность площадью  $S=10$  см<sup>2</sup> за время  $t=5$  мин нормально падает монохроматический свет, энергия которого  $W=20$  Дж. Определите, световое давление, оказываемое на поверхность.

### Контрольная работа №6

### ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

#### ТЕОРИЯ БОРА ДЛЯ АТОМА ВОДОРОДА

В соответствии с постулатом Бора, радиус орбиты, по которой движется электрон, удовлетворяет следующему соотношению:  $mV_n R_n = nh/2\pi$ , где:  $m$ - масса электрона,  $h$ - постоянная Планка, равная  $6.6 \cdot 10^{-34}$  Дж с,  $R_n$  – радиус орбиты,  $V_n$ - скорость электрона,  $n$  – главное квантовое число.

Потенциальная энергия электрона в поле ядра, находящегося на орбите радиуса  $R_n$  равна:

$$W = -Ze^2/4\pi\epsilon_0 R_n,$$

Где  $\epsilon_0$ - электрическая постоянная,  $Z$ -заряд ядра,

Кинетическая энергия электрона на любой орбите равна половине его потенциальной энергии на этой орбите:

$$E_k = |W|/2 = mV_n^2/2,$$

$V_n$ - скорость электрона на соответствующей орбите.

Полная энергия электрона в атоме равна:

$$E = E_k + W = -W/2$$

Полная энергия электрона в атоме водорода на орбите  $n$  равна:

$$E_n = -E_0/n^2,$$

где  $E_0 = 13.6$  эВ – есть энергия электрона в основном состоянии,  $n$ - величина главного квантового числа.

Частота спектральных линий в спектре атома водорода равна  $\nu = cR(1/m^2 - 1/n^2)$ , где  $R$ - постоянная Ридберга, равная  $1 \cdot 10^7$  м<sup>-1</sup>,  $c$ - скорость света,  $m$ - целое число 1, 2, и т.д. определяет тип серии ( $m=1$  – серия Лаймана.  $m=2$  – серия Бальмера.  $m=3$  – серия Пашена и т. д.);  $n$  – принимает целочисленные значения, начиная с  $m+1$ . (определяет отдельные линии каждой серии). Например,  $m=1$  (серия Лаймана). Подставляя в формулу (??)  $n=2, 3, 4, 5, \dots$ , получим группу переходов, образующих серию Лаймана.

При переходе водородоподобного иона из одного стационарного состояния  $m$  в другое ( $n$ ) испускается (при  $m > n$ ) или поглощается ( $n < m$ ) квант энергии:

$$\Delta E = h\nu = E_m - E_n = Z^2 Rhc (1/m^2 - 1/n^2),$$

Где  $Z$  заряд ядра, равный порядковому номеру элемента в таблице Менделеева.

Серия Лаймана – расположена в ультрафиолетовой области спектра, серия Бальмера - в видимой области спектра, все последующие серии – в инфракрасной области спектра. Э

### ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Согласно де Бройлю, микрочастица обладает энергией и импульсом (корпускулярные свойства) и частотой и длиной волны (волновые свойства). Количественное соотношение, связывающее оба этих свойства

$$\lambda = h/p = h/(2E_k m)^{1/2}$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $p$  – импульс частицы.  $E_k$  – кинетическая энергия частицы,  $m$  – масса частицы,  $\lambda$  – длина волны де Бройля.

Длина волны де-Бройля электрона, находящегося на орбите радиуса  $R_n$ , определяется как:

$$\lambda_n = 2\pi R_n / n$$

где  $n$  – главное квантовое число,  $R_n$  – радиус орбиты электрона, энергия которого равна  $E_n$ , определяется следующим образом:

$$R_n = n^2 r_0,$$

где  $r_0$  – радиус первой ( $n=1$ ) орбиты электрона в атоме водорода, равный  $0.5 \cdot 10^{-10}$  м;  $n$  – главное квантовое число.

## ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

Радиус ядра:

$$R = R_0 A^{1/3},$$

где  $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$  м;  $A$  – массовое число (число нуклонов в ядре).

Энергия связи нуклонов в ядре:

$$E_{св} = [Zm_p + (A-Z)m_n - m_{я}]c^2,$$

где  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_{я}$  – соответственно массы протона, нейтрона и ядра;  $Z$  – зарядовое число ядра (число протонов в ядре);  $A$  – массовое число;

$m_n = m_p + m_e$  – масса атома водорода ( ${}^1_1H$ ).

Дефект массы ядра:

$$\Delta m = [Zm_p + (A-Z)m_n] - m_{я}.$$

Удельная энергия связи (энергия связи, отнесенная к одному нуклону):

$$\delta E_{св} = \frac{E_{св}}{A}.$$

Число ядер, распавшихся в среднем за промежуток времени от  $t$  до  $t+dt$ ,

$$dN = -\lambda N dt,$$

где  $N$  – число не распавшихся ядер к моменту времени  $t$ ;  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада.

Закон радиоактивного распада:

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

где  $N_0$  – начальное число не распавшихся ядер (в момент времени  $t=0$ );  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада.

Число ядер, распавшихся за время  $t$ ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

Связь периода полураспада  $T_{1/2}$  и постоянной радиоактивного распада  $\lambda$ :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Связь среднего времени жизни  $\tau$  радиоактивного ядра и постоянной  $\lambda$  радиоактивного распада

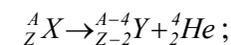
$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Активность нуклида:

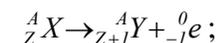
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

Правила смещения:

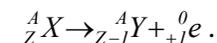
для  $\alpha$ -распада:



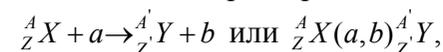
для  $\beta^-$ -распада:



для  $\beta^+$ -распада:



Символическая запись ядерной реакции:



где  ${}^A_Z X$  ( ${}^{A'}_{Z'} Y$ ) – исходное (конечное) ядра с зарядовыми числами  $Z$  и  $Z'$  и массовыми числами  $A$  и  $A'$ ,  $a$  и  $b$  – соответственно бомбардирующая и испускаемая в ядерной реакции частицы.

Энергия ядерной реакции:

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

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы;  $(m_3+m_4)$  – сумма масс покоя ядер продуктов реакции. При  $Q>0$  – экзотермическая реакция, при  $Q<0$  – эндотермическая реакция.

Скорость нарастания цепной реакции деления урана:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T},$$

откуда

$$N=N_0 \exp\left(\frac{N(k-1)}{T}\right),$$

где  $N_0$  – число нейтронов в начальный момент времени;  $N$  – число нейтронов в момент времени  $t$ ;  $T$  – среднее время жизни одного поколения нейтронов;  $k$  – коэффициент размножения нейтронов.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Электрон в атоме водорода находится на втором энергетическом уровне. Определите кинетическую  $T$ , потенциальную  $П$  и полную  $E$  энергии электрона. .

#### Решение

Потенциальная энергия электрона в атоме водорода равна

$$П = -13.6/n^2,$$

где  $n$  -главное квантовоу число.

Полная ( $E$ ) и кинетическая ( $E_k$ ) энергии электрона в атоме равны:

$$E_k=|П|/2, \quad E=-П/2$$

В соответствии с вышеприведенными формулами для электрона атома водорода, находящегося на второй орбите ( $n=2$ ) значения энергий будут следующими:

$$П = -13.6/4 = -3.4 \text{ эВ}$$

$$E_k = |П|/2 = 1.7 \text{ эВ}$$

$$E = -П/2 = -1.7 \text{ эВ}$$

**Ответ:**  $П = -13.6/4 = -3.4 \text{ эВ}$

$$E_k = |П|/2 = 1.7 \text{ эВ}$$

$$E = -П/2 = -1.7 \text{ эВ}$$

**Пример 2..** Определите длины волн де Бройля электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов  $U=100 \text{ В}$ .

#### Решение

Количественное соотношение, связывающее квантовые и волновые свойства микрочастиц имеет вид:

$$\lambda = h/p = h/(2E_k m)^{1/2},$$

(1)

где  $h$  – постоянная Планка,  $p$  – импульс частицы.  $E_k$  – кинетическая энергия частицы,  $m$  – масса частицы,  $\lambda$  – длина волны де Бройля.

Кинетическая энергия электрона в электрическом поле

$$E_k = eU \quad (2),$$

где  $U$  – ускоряющая разность потенциалов.

Определяем значения длины волны де Бройля.

$$\lambda_e = h/(2E_k m_e)^{1/2} = h/(2eUm_e)^{1/2}$$

$$\lambda_p = h/(2E_k m_p)^{1/2} = h/(2eUm_p)^{1/2}$$

Из таблиц берем данные:

$$m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Подставляя значения, получим

$$\lambda_e = h/(2E_k m_e)^{1/2} = 6.6 \cdot 10^{-34} / (2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 9 \cdot 10^{-31})^{1/2} = 1.23 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$\lambda_p = h/(2E_k m_p)^{1/2} = 6.6 \cdot 10^{-34} / (2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27})^{1/2} = 2.86 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

м

Ответ:  $\lambda_p^{1/2} = 2.86 \cdot 10^{-12} \text{ м}$

**Пример 3.** Вычислите энергию, выделившуюся при ядерной реакции  $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$ .

**Решение**

Изменение энергии при ядерной реакции равно

$$Q = \Delta m c^2 = c^2 (\Sigma m_1 - \Sigma m_2)$$

Где:  $\Delta m$  – дефект масс,  $\Sigma m_1$  – масса исходных частиц (протона и ядра лития),  $\Sigma m_2$  – масса образовавшихся частиц (ядра гелия).

$$\Sigma m_1 = (1.672 + 3 \times 1.672 + 4 \times 1.674) \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 23.416 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$$

$$\Sigma m_2 = (2 \times 1.672 + 2 \times 1.674) \cdot 2 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 13.384 \cdot 10^{-27} \text{ кг} .$$

$$\text{Следовательно, } \Delta m = (23.416 - 13.384) \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 10.032 \cdot 10^{-27} \text{ кг} .$$

$$Q = 10.032 \cdot 10^{-27} \times 9 \cdot 10^{16} = 90.2 \cdot 10^{-11} \text{ (Дж.)}$$

Ответ:  $Q = 90.2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ .

**Пример 4.** Вычислите дефект массы и энергию связи нуклонов в дейтерии  ${}^2_1\text{H}$  и тритии  ${}^3_1\text{H}$ .

**Решение**

Энергия связи нуклонов в ядре равна:

$$W = \Delta m c^2 ,$$

где дефект масс  $\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\text{я}}$ ,

где  $M_{\text{я}}$  – масса ядра,  $Z$  – порядковый номер элемента в таблице Менделеева,  $m_n$  и  $m_p$  – масса нейтрона и протона соответственно.

Для  ${}^3_1\text{H}$  табличное значение массы ядра равно  $3.016 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Тогда

$$W = (1.672 + 2 \times 1.674 - 3.016) \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 18.036 \cdot 10^{-11}$$

Дж

Для  ${}^2_1\text{H}$  табличное значение массы ядра равно  $2.014 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Тогда

$$W = (1.672 + 1.674 - 2.014) \cdot 10^{-27} \times 9 \cdot 10^{16} = 11.988 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

Ответ:  $W = 11.988 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$

**Пример 5.** Определите период полураспада  $T_{1/2}$  некоторого радиоактивного изотопа, если его активность за 5 суток уменьшилась в 2,2 раза.

**Решение**

Начальная активность радионуклида:

$$A_0 = \lambda N_0,$$

$$\lambda = \ln 2 / T,$$

где  $T$  – период полураспада,  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада,  $t$  – текущая координата времени  
Величина активности радионуклида зависит от времени по закону

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t),$$

где  $A_0$  – начальная активность радионуклида

По условию задачи

$$A_0 / A = A_0 / A_0 \exp(-\lambda / 5) = 1 / \exp(-\ln 2 / 5T) = 2.2$$

После преобразования получаем

$$T = 0.138 / \ln 2 = 0.17 \text{ суток}$$

Ответ:  $T = 0.17 \text{ суток}$

**Пример 6.** Определите, во сколько раз начальное количество ядер радиоактивного изотопа уменьшится за три года, если за один год оно уменьшилось в 4 раза.

**Решение**

Число распавшихся ядер определяется как

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

Тогда:

$N_1 = N_0 \exp(-\lambda/1)$  – число распавшихся ядер за 1 год

$N_2 = N_0 \exp(-\lambda/3)$  число распавшихся ядер за 3 год

$N_{01} = N_0 - N_1$  число нераспавшихся ядер через 1 год

$N_{02} = N_0 - N_2$  число нераспавшихся ядер через 3 года

По условию задачи надо найти отношение  $N_{01}/N_{02}$

По условию задачи  $N_{01}/N_{02} = 4 = N_0 / (N_0 (1 - \exp(-\lambda))) = 1 / (1 - \exp(-\lambda))$ .

Из этого равенства определяем  $\lambda$ . Получаем  $\lambda =$

$$\ln 1.3 = 0.26.$$

Определяем X

$$N_{01}/N_{02} = N_0 / (N_0 (1 - \exp(-0.26/3))) = 12.5$$

**Ответ:**  $N_{01}/N_{02} = 12.5$

:

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 6**

Вариант	Номера задач					
	600	610	620	630	640	650
0	600	610	620	630	640	650
1	601	611	621	631	641	651
2	602	612	622	632	642	652
3	603	613	623	633	643	653
4	604	614	624	634	644	654
5	605	615	625	635	645	655
6	606	616	626	636	646	656
7	607	617	627	637	647	657
8	608	618	628	638	648	658
9	609	619	629	639	649	659

600. Найдите период обращения электрона на первой боровской орбите атома водорода и его угловую скорость.

601. Найдите кинетическую, потенциальную и полную энергию электрона на первой боровской орбите.

602. Найдите первый потенциал возбуждения атома водорода.

603. Определите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на второй.

604. Используя теорию Бора, определите орбитальный магнитный момент электрона с более высокого уровня энергии на более низкий уровень, если при этом энергия атома уменьшилась на 10 эВ.

605. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны  $\lambda = 1215$  нм. Вычислите по теории Бора радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

606. Электрон в атоме водорода находится на втором энергетическом уровне. Определите кинетическую  $T$ , потенциальную  $P$  и полную  $E$  энергии электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

607. Определите максимальную энергию фотонов серии Пашена в спектре излучения атома водорода.

608. Вычислите по теории Бора радиус  $r_2$  второй стационарной орбиты и скорость  $v_2$  электрона на этой орбите для атома водорода.

609. Найдите наибольшую  $\lambda_{max}$  и наименьшую  $\lambda_{min}$  длины волн в первой инфракрасной серии водорода (серия Пашена).

610. В однозарядном ионе лития электрон перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определите длину волны  $\lambda$  излучения, испущенного ионом лития.

611. В однозарядном ионе гелия электрон перешел со второго энергетического уровня на первый. Определите длину волны  $\lambda$  излучения, испущенного ионом гелия.

612. Вычислите по теории Бора радиус  $r_1$  первой боровской орбиты и скорость  $v_1$  электрона на этой орбите для иона  $He^+$ .

613. Определите первый потенциал  $\varphi_1$  возбуждения и энергию ионизации  $E_1$  иона  $He^+$ , находящегося в основном состоянии.

614. Определите наименьшую энергию, необходимую для возбуждения полного спектра дважды ионизованных атомов лития.

615. Определите скорость электрона на второй и третьей орбите в дважды ионизированных атомах лития.

616. Определите первый потенциал возбуждения иона  $B^{3+}$ .

617. Определите период обращения электрона на второй орбите в ионе  $He^+$ .

618. Определите радиус второй и третьей электронных орбит в ионе  $Li^{2+}$ .

619. Какую наименьшую скорость должен иметь электрон, чтобы при соударении с ионом  $B^{3+}$  вызвать излучение хотя бы одной спектральной линии?

620. Определите скорость  $v$  электрона, при которой длина волны де Бройля  $\lambda=0,01$  А.

621. Определите энергию  $\Delta T$ , которую необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от  $\lambda_1=0,2$  мм до  $\lambda_2=0,1$  нм.

622. На сколько по отношению к комнатной должна измениться температура идеального газа, чтобы дебройлевская длина волны его молекул уменьшилась на 20%?

623. Протон обладает кинетической энергией  $T=1$  кэВ. Определите дополнительную энергию  $\Delta T$ , которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волны  $\lambda$  де Бройля уменьшилась в три раза.

624. Определите длины волн де Бройля  $\alpha$ -частицы и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов  $U=1$  кВ.

625. Кинетическая энергия  $T$  электрона равна удвоенному значению энергии покоя ( $2m_0c^2$ ). Вычислите длину волны  $\lambda$  де Бройля для такого электрона.

626. Электрон обладает кинетической энергией  $T=0,51$  МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия  $T$  электрона возрастает вдвое?

627. Определите длины волн де Бройля электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов  $U=100$  В.

628. Электрон обладает кинетической энергией  $T=100$  эВ. Определите величину дополнительной энергии  $\Delta T$ , которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась вдвое.

629. Определите дебройлевскую длину волны  $\lambda$  электрона, кинетическая энергия которого  $T=1,02$  МэВ.

630. Определите дефект массы  $\Delta m$  и энергию связи  $E_{св}$  ядра  ${}^3_4B$ .

631. Во сколько раз отличается удельная энергия связи для ядер  ${}^3_2He$  и  ${}^3_1He$ ?

632. Во сколько раз отличается удельная энергия связи для ядер  ${}^7_3\text{Li}$  и  ${}^7_4\text{Be}$ ?

633. Найдите удельную энергию  $E_{\text{уд}}$  связи ядра  ${}^{11}_5\text{B}$ .

634. Вычислите дефект массы и энергию связи ядер дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$ .

635. Вычислите дефект массы и энергию связи изобаров  ${}^{20}_{10}\text{Ne}$  и  ${}^{20}_9\text{F}$ . Сравните удельные энергии связи.

636. Как отличается удельная энергия связи для изотопов кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$  и  ${}^{17}_8\text{O}$ ?

637. Вычислите дефект масс, энергию и удельную энергию связи ядра  ${}^{16}_8\text{O}$ .

638. Вычислите дефект масс, энергию и удельную энергию связи ядра альфа-частицы.

639. Вычислите дефект масс, энергию и удельную энергию связи ядра  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ .

640. Вследствие радиоактивного распада  ${}^{238}_{92}\text{U}$  превращается в  ${}^{206}_{86}\text{Pb}$ . Сколько альфа- и бета-превращений он при этом испытывает?

641. Вычислите энергию выделившуюся при ядерной реакции  $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$ .

642. Вычислите энергию выделившуюся при ядерной реакции  $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$ .

643. Вычислите энергию выделившуюся при ядерной реакции  ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + p$ .

644. Вычислите энергию выделившуюся при ядерной реакции  $p + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow 3 {}^4_2\text{He}$ .

645. Вычислите энергию выделившуюся при ядерной реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$ .

646. Вычислите энергию выделившуюся при ядерной реакции  $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + n$ .

647. Найдите энергию, выделяющуюся при реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$ .

648. Найдите энергию, выделяющуюся при реакции  ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

649. Найдите энергию, выделяющуюся при реакции  ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

650. Какая доля первоначального количества радиоактивного изотопа распадается за время жизни этого изотопа?

651. Сколько атомов полония распадается за время  $\Delta t = 1$  сут из  $N = 10^6$  атомов?

652. Начальная активность 1 г изотопа радия  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  равна 1 Ки. Определите период полураспада  $T_{1/2}$  этого изотопа.

653. Определите период полураспада  $T_{1/2}$  некоторого радиоактивного изотопа, если его активность за 5 суток уменьшилась в 2,2 раза.

654. Найдите период полураспада  $T_{1/2}$  радиоактивного изотопа, если его активность за время  $t = 10$  суток уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной.

655. Определите, какая доля радиоактивного изотопа  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  распадается в течение времени  $t = 6$  суток.

656. Активность  $A$  некоторого изотопа за время  $t = 10$  суток уменьшилась на 20%. Определите период полураспада  $T_{1/2}$  этого изотопа.

657. Определите массу  $m$  изотопа  ${}^{131}_{53}\text{I}$ , имеющего активность 37 ГБк.

658. Определите, что (и во сколько раз) продолжительнее – три периода полураспада или два средних времени жизни радиоактивного ядра.

659. Определите, во сколько раз начальное количество ядер радиоактивного изотопа уменьшится за три года, если за один год оно уменьшилось в 4 раза.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1

Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	G	6,67·10 <sup>-11</sup> (кг·с <sup>2</sup> )
Постоянная Авогадро	N <sub>A</sub>	6,02·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	K	1,38·10 <sup>-23</sup> Дж/К
Стандартный объем	V <sub>m</sub>	22,4·10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /моль
Элементарный заряд	e	1,60·10 <sup>-19</sup> Кл
Скорость света в вакууме	c	3,00·10 <sup>8</sup> м/с
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	5,67·10 <sup>-8</sup> Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная Вина	b	2,90·10 <sup>-3</sup> м·К
Постоянная Планка	h	6,63·10 <sup>-34</sup> Дж·с
Постоянная Ридберга	R	1,10·10 <sup>7</sup> м <sup>-1</sup>
Радиус Бора	a	0,529·10 <sup>-10</sup> м
Комптоновская длина волны электрона	λ	2,43·10 <sup>-12</sup> м
Магнетон Бора	μ <sub>B</sub>	0,927·10 <sup>-23</sup> А·м <sup>2</sup>
Энергия ионизации атома	E <sub>I</sub>	2,18·10 <sup>-18</sup> Дж (13,6эВ)
Атомная единица массы	а.е.м.	1,660·10 <sup>-27</sup> кг
Электрическая постоянная	ε <sub>0</sub>	8,85·10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнитная постоянная	μ <sub>0</sub>	4π·10 <sup>-7</sup> Гн/м

Таблица 2

Энергия ионизации

Вещество	E <sub>i</sub> , Дж	E <sub>i</sub> , эВ
Водород	2,18·10 <sup>-18</sup>	13,6
Гелий	3,94·10 <sup>-18</sup>	24,6
Литий	1,21·10 <sup>-17</sup>	75,6
Ртуть	1,66·10 <sup>-18</sup>	10,4

Таблица 3

Работа выхода электронов

Металл	A, Дж	A, эВ
Калий	3,5·10 <sup>-19</sup>	2,2
Литий	3,7·10 <sup>-19</sup>	2,3
Платина	10·10 <sup>-19</sup>	6,3
Рубидий	3,4·10 <sup>-19</sup>	2,1
Серебро	7,5·10 <sup>-19</sup>	4,7
Цезий	3,2·10 <sup>-19</sup>	2,0
Цинк	6,4·10 <sup>-19</sup>	4,0

Таблица 4

Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	m <sub>0</sub>		E <sub>c</sub>	
	Кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	9,11·10 <sup>-31</sup>	0,00055	8,16·10 <sup>-14</sup>	0,511
Протон	1,672·10 <sup>-27</sup>	1,00728	1,50·10 <sup>-10</sup>	938
Нейтрон	1,675·10 <sup>-27</sup>	1,00867	1,51·10 <sup>-10</sup>	939
Дейтрон	3,35·10 <sup>-27</sup>	2,01355	3,00·10 <sup>-10</sup>	1876
α-частица	6,64·10 <sup>-27</sup>	4,00149	5,96·10 <sup>-10</sup>	3733
Нейтральный мезон	2,41·10 <sup>-28</sup>	0,14498	2,16·10 <sup>-11</sup>	135

Таблица 5

## Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50

Таблица 6

## Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса а.е.м.
Нейтрон	${}^1_0n$	1,00867	Бериллий	${}^7_4Be$	7,01693
				${}^9_4Be$	9,01219
Водород	${}^1_1H$	1,00783	Бор	${}^{10}_5B$	10,01294
	${}^2_1H$	2,01410		${}^{11}_5B$	11,00930
	${}^3_1H$	3,01605			
Гелий	${}^3_2He$	3,01603	Углерод	${}^{12}_6C$	12,00000
	${}^4_2He$	4,00260		${}^{13}_6C$	13,00335
				${}^{14}_6C$	14,00324
Литий	${}^6_3Li$	6,01513	Азот	${}^{14}_7N$	14,00307
	${}^7_3Li$	7,01601			
			Кислород	${}^{16}_8O$	15,99491
				${}^{17}_8O$	16,99913
			Неон	${}^{20}_{10}Ne$	19,9920
			Фтор	${}^{20}_9F$	19,9984

Таблица 7

## Период полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	${}^{225}_{89}Ac$	10 сут.
Иод	${}^{131}_{53}I$	8 сут.
Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 г.
Магний	${}^{27}_{12}Mg$	10 мин
Радий	${}^{226}_{86}Ra$	1620 лет
Радон	${}^{222}_{86}Rn$	3,8 сут.
Стронций	${}^{90}_{38}Sr$	27 лет
Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 сут.
Цезий	${}^{144}_{58}Ce$	265 сут.
Иридий	${}^{192}_{77}Ir$	74 дня