

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА”**

**Кафедра физики**

**И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, В. Г. РОДНЕНКОВ**

# **ФИЗИКА ДЛЯ ЭКОНОМИСТОВ**

**Часть 2**

**МАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.  
КВАНТОВАЯ ОПТИКА. ФИЗИКА АТОМА И ЯДРА**

**Учебно-методическое пособие**

## **Гомель 2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА”

Кафедра физики

И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, В. Г. РОДНЕНКОВ

# ФИЗИКА ДЛЯ ЭКОНОМИСТОВ

Часть 2

МАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.  
КВАНТОВАЯ ОПТИКА. ФИЗИКА АТОМА И ЯДРА

*Одобрено методической комиссией заочного факультета  
в качестве учебно-методического пособия  
для студентов-заочников специальности «Экономика  
и организация производства (по направлениям)»*

Гомель 2014

УДК 531/534 (075.8)  
ББК 22.3  
Д29

Рецензент – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов* (УО «БелГУТ»).

**Деликатная, И. О.**

Д29 Физика для экономистов : учеб.-метод. пособие. В 2 ч. Ч. 2.  
Магнетизм. Колебания и волны. Квантовая оптика. Физика атома и  
ядра / И. О. Деликатная, В. Г. Родненков ; М-во образования Респ.  
Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 100 с.  
ISBN 978-985-554-311-5 (ч. 2)

В первой части пособия (Гомель : БелГУТ, 2013) были изложены материалы для выполнения контрольных работ по разделам «Механика. Молекулярная физика. Электричество».

Во второй части приведены общие методические указания, вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы, основная и дополнительная литература, сведения из теории, примеры решения задач, задачи для контрольных работ и справочные таблицы по разделам «Магнетизм. Колебания и волны. Квантовая оптика. Физика атома и ядра», программы курса физики для экономических специальностей вузов.

Предназначено для методического обеспечения самостоятельной работы по физике студентов экономических специальностей заочного факультета БелГУТа.

**УДК 531/534 (075.8)**  
**ББК 22.3**

ISBN 978-985-554-311-5 (ч. 2)  
ISBN 978-985-554-177-7

© Деликатная И. О., Родненков В. Г. 2014  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2014

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Дисциплина «Физика» делится на шесть разделов. В соответствии с этим учебный материал разделен на две части, которые включают в себя по три раздела курса. Изучение курса физики сопровождается выполнением двух контрольных работ из восьми задач. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем в конце соответствующей экзаменационной сессии.

Процесс изучения курса физики студентом заочной формы обучения состоит из следующих основных этапов: самостоятельное изучение физики по учебным пособиям, решение задач, выполнение контрольных работ и их защита преподавателю, выполнение лабораторных работ, сдача зачетов и экзаменов.

### **Самостоятельная работа по учебным пособиям**

Этот вид занятий является главным в учебной работе студента заочной формы обучения. При этом необходимо руководствоваться следующим:

- Курс физики необходимо изучать систематически в течение всего учебного процесса. Изучение курса в сжатые сроки перед экзаменом не дает глубоких и прочных знаний.

- Избрав какое-нибудь учебное пособие в качестве основного, студент должен придерживаться его при изучении всего курса или, по крайней мере, целого раздела. Замена одного учебного пособия другим в процессе изучения ведет к утрате логической связи между отдельными вопросами. Если же основное пособие не дает полного ответа на отдельные вопросы программы, необходимо обратиться и к другим учебным пособиям.

- Работа над учебным пособием сопровождается составлением конспекта, в котором записываются формулировки законов и выражающие их формулы, определения физических величин и единиц их измерения, выполняется чертеж и решаются типовые задачи.

- Изучая курс физики, студент встречается с большим количеством единиц измерения, которые объединяются в Международную систему

единиц (СИ). Студент должен помнить, что без основательного знания системы единиц, без умения пользоваться ими при решении физических задач невозможно усвоить курс физики и тем более применять физические знания на практике.

- Всю работу по овладению курса физики студент должен подвергать систематическому самоконтролю с помощью вопросов, которые приводятся в пособии при изучении каждого раздела.

Студент не должен ограничиваться только запоминанием физических формул. Он должен осмыслить их и уметь самостоятельно вывести.

### **Решение задач**

Необходимым условием успешного изучения курса общей физики является систематическое решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить в памяти студента формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

При решении задач необходимо:

- выбрать основные законы и формулы, которые используются при решении задачи, вспомнить словесную формулировку этих законов, разъяснить буквенные обозначения, употребляемые при написании формул. При использовании для решения задач формулы, которая является частным случаем и не выражает физический закон или не является определением какой-нибудь физической величины, эту формулу следует вывести, сопровождая решение краткими исчерпывающими пояснениями;

- сопровождать решение краткими исчерпывающими пояснениями;

- все величины, входящие в условие задачи, выразить в единицах СИ. Проверить размерность искомой величины. Для этого подставить в правую часть полученной формулы вместо обозначений величин наименования их единиц и проверить, получается ли в результате единица искомой величины. Полученная верно рабочая формула должна давать правильную размерность искомой величины;

- в окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, подставить числовые значения, выраженные в единицах одной системы (СИ). Пренебрежение этим правилом приводит к неверному результату;

- произвести вычисления величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений, при необходимости – представлять результат в виде степенного числа. Записать в ответе числовое значение и размерность единицы измерения искомой величины в СИ;

- оценить правдоподобность полученного результата.

Физические задачи весьма разнообразны, и дать единую схему их решения невозможно. Однако, как правило, физические задачи следует решать в общем виде, т. е. в буквенных выражениях, не производя вычисления промежуточных величин. Числовые значения подставляются только в окончательную рабочую формулу, выражающую искомую величину. Умение решать задачи приобретается длительными и систематическими упражнениями.

### **Требования к оформлению контрольных работ**

Выполнение контрольных работ студентом и их рецензирование преследует две цели: во-первых, таким путем осуществляется контроль за самостоятельной работой студента; во-вторых, проверяется усвоение студентом соответствующего материала с целью оказать при необходимости ему помощь по вопросам, которые оказались слабо усвоены или не поняты студентом.

По каждому разделу курса общей физики студент-заочник приступает к выполнению контрольных работ только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с приемами решения задач, приведенных в данном пособии по каждому разделу курса.

При этом необходимо руководствоваться следующим:

- Контрольные работы № 1 и 2 выполняются каждая в отдельной школьной тетради, только по условиям задач данного пособия. Замена какой-либо контрольной работы другой, взятой из аналогичного пособия, не допускается.

- На лицевой стороне контрольной работы приводятся сведения по следующему образцу:

|   |
|---|
| Кафедра физики<br>Контрольная работа № __ по физике<br>(задачи № _____ )<br>студента __ курса (группа _____ ) Иванова Ивана Петровича<br>Учебный шифр № _____<br>Домашний адрес: 246028, г. Гомель, ул. им. Кожара, д. 22, кв. 17 |
|---|



- Выполнять контрольные работы следует чернилами или шариковой ручкой. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Условие задачи переписывается полностью, без сокращений. Для замечаний рецензента на страницах тетради оставляются поля.

- Все решаемые задачи сопровождаются краткими, но исчерпывающими пояснениями, раскрывающими физический смысл используемых формул, и с обязательным выполнением основных правил решения задач.

- В конце каждой контрольной работы студент-заочник должен привести название учебника или учебного пособия, которым он пользовался, автора и год издания, чтобы рецензент в случае необходимости мог конкретно указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

- Получив прорецензированную работу, студент обязан устранить недостатки, указанные рецензентом.

- Если при рецензировании контрольная работа получает пометку «Доработать», студент обязан послать ее на повторное рецензирование, включив в нее дополнительные решения тех задач, в которых были допущены ошибки. Работа над ошибками выполняется в той же тетради (в конце контрольной работы).

- Студент является на экзаменационную сессию, получает на кафедре прорецензированные работы и по расписанию деканата защищает их перед преподавателем. Студент должен быть готов при защите контрольной работы дать пояснения по существу решения входящих в нее задач. Защищенные контрольные работы остаются у экзаменатора.

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РАЗДЕЛАМ ПРОГРАММЫ**

### **Магнетизм**

*Магнитное поле в вакууме.* Магнитное взаимодействие. Магнитное поле. Магнитная индукция. Силовые линии магнитного поля. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле прямолинейного и кругового токов. Закон Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов.

Магнитный момент контура с током. Магнитное поле движущегося заряда. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Магнитное поле соленоида и тороида.

*Движение заряженных частиц в магнитном и электрическом полях.* Сила Лоренца. Эффект Холла. Ускорение заряженных частиц. Масс-спектрометры.

*Магнитное поле в веществе.* Понятие об элементарных токах в веществе. Элементарный ток во внешнем магнитном поле. Намагниченность. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Напряженность магнитного поля. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетики и их свойства. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Природа ферромагнетизма.

*Электромагнитная индукция.* Поток вектора магнитной индукции. Потокосцепление. Работа по перемещению проводника с током и контура с током в магнитном поле. Опыты Фарадея. ЭДС электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Токи при размыкании и замыкании цепи. Индуктивность контура. Явление самоиндукции. Взаимная индукция. Трансформатор.

*Энергия магнитного поля.* Энергия магнитного поля соленоида. Плотность энергии магнитного поля.

*Основы теории Максвелла.* Обобщение закона электромагнитной индукции. Ток смещения. Уравнения Максвелла для произвольных полей.

## Колебания и волны

*Свободные гармонические колебания.* Характеристики колебаний. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Простые колебательные системы. Энергия при колебаниях. Сложение гармонических колебаний. Настройка по биениям. Модуляция.

*Затухающие колебания.* Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний и его решение. Параметры затухания. Диссипация энергии. Демпфирование в технике.

*Вынужденные колебания.* Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс. Переменный ток. Автоколебания, их применение в технике. Параметрический резонанс и его применение в технике.

*Волновые процессы.* Бегущие и стоячие волны. Фазовая скорость, длина волны, волновое число. Волновое уравнение. Дисперсия. Волновой пакет. Групповая скорость и перенос энергии. Энергия вол-

ны, поток и плотность потока энергии (вектор Умова). Элементы акустики. Свойства ультразвука.

*Электромагнитные волны.* Поток энергии электромагнитного поля. Плотность потока (вектор Пойнтинга). Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла. Свободные электромагнитные волны. Электромагнитные волны в направляющих средах. Эффект Доплера для упругих и электромагнитных волн. Квазиоптика. Отражение и преломление электромагнитных волн. Радиолокация.

### **Волновая оптика**

*Интерференция света.* Когерентность и монохроматичность световых волн. Время и длина когерентности. Оптическая длина пути и разность хода. Расчет простейших интерференционных картин. Многолучевая интерференция. Интерферометры и их применение в измерительных комплексах.

*Дифракция света.* Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Приближения Френеля и Фраунгофера. Границы применимости геометрической оптики. Простые задачи дифракции. Разрешающие способности оптических и спектральных приборов. Дифракция на кристаллах. Голография и ее применение.

*Взаимодействие света с веществом.* Дисперсия света, элементы ее элементарной электронной теории. Поглощение света. Излучение Вавилова-Черенкова.

*Поляризация света.* Свойства и виды поляризованного света. Поляризация при отражении и преломлении, закон Брюстера. Закон Малюса. Двойное лучепреломление. Искусственная оптическая анизотропия. Оптические затворы. Элементы нелинейной оптики. Световоды.

### **Квантовая оптика**

*Тепловое излучение.* Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения. Формула Планка. Оптическая пирометрия.

*Фотоны.* Внешний фотоэффект и его законы. Энергия и импульс фотонов. Давление света. Эффект Комптона. Дуализм свойств света.

### **Физика атома и ядра**

*Планетарная модель атома.* Постулаты Бора. Теория водородоподобных атомов. Энергия ионизации. Спектр атома водорода, серии и линии.

*Корпускулярно-волновой дуализм.* Гипотеза де Бройля. Соотношения неопределенностей. Волновая функция. Уравнение Шредингера.

ра. Движение свободной частицы. Частица в потенциальной яме. Туннельный эффект.

*Электроны в атоме.* Атом водорода. Квантовые числа, определяемые ими параметры. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Периодическая система элементов. Спектры атомов и молекул. Вынужденное излучение. Лазеры.

*Элементы квантовой статистики.* Фазовое пространство. Элементарная ячейка. Функции распределения. Статистики Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Электропроводность металлов. Сверхпроводимость. Фотонный и фононный газы. Электронная теплоемкость. Теплоемкость кристаллической решетки.

*Энергетические зоны в кристаллах* и распределение по ним электронов. Число электронных состояний в зоне. Заполнение зон: металлы, диэлектрики, полупроводники. Собственные и примесные полупроводники.

*Контактные явления.* Контакт электронного и дырочного полупроводников. Туннельные явления на контакте. Полупроводниковые лазеры. Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов. Фазовые диаграммы. Поведение в электрическом и магнитном полях.

*Характеристики и свойства ядра.* Нуклоны. Ядерные силы. Энергия связи. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада и его статистический смысл. Виды радиоактивности.

*Ядерные реакции.* Деление ядер. Ядерный реактор. Термоядерные реакции. Элементарные частицы; классификация и взаимопревращения. Фундаментальные взаимодействия.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная

- 1 **Савельев, И. В.** Курс общей физики. В 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 2. – 496 с.
- 2 **Савельев, И. В.** Курс общей физики : в 3 т. / И. В. Савельев. – 3-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – Т. 3. – 320 с.
- 3 **Детлаф, А. А.** Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 608 с.
- 4 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1997. – 542 с.
- 5 **Трофимова, Т. И.** Сборник задач по курсу физики для втузов : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 3-е изд. – М. : ОНИКС-21 век; Мир и Образование, 2005. – 383 с.

6 **Чертов, А. Г.** Задачник по физике : учеб. пособие для вузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 526 с.

### Дополнительная

1 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 381 с.

2 **Калашников, С. Г.** Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Высш. шк., 1964. – 668 с.

3 **Матвеев, А. Н.** Электричество и магнетизм / А. Н. Матвеев. – М. : Высш. шк., 1983. – 463 с.

4 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике / И. Е. Иродов. – М. : Наука, 1988. – 416 с.

5 **Савельев, И. В.** Сборник задач и вопросов по общей физике / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 288 с.

6 **Чертов, А. Г.** Физические величины / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 315 с.

7 **Сена, Л. И.** Единицы физических величин и их размерности / Л. И. Сена. – М. : Наука, 1988. – 432 с.

8 Физика : задания к практическим занятиям / под ред. Ж. П. Лагутиной. – Мн. : Вышэйшая школа, 1989. – 236 с.

9 Сборник задач по физике / под ред. М. С. Цедрика. – Мн. : Вышэйшая школа, 1976. – 320 с.

10 **Кухлинг, Х.** Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1985. – 520 с.

11 **Новодворская, Е. М.** Методика проведения упражнений по физике во вузе / Е. М. Новодворская, Э. М. Дмитриева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1981. – 318 с.

12 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике : учеб. пособие / И. Е. Иродов. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 416 с.

13 **Фирганг, Е. В.** Руководство к решению задач по курсу общей физики : учеб. пособие для студ. вузов / Е. В. Фирганг. – М. : Высш. шк., 1978. – 351 с.

## МАГНЕТИЗМ (СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ)

**Закон Био – Савара – Лапласа.** Элемент  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  создает в некоторой точке пространства магнитное поле, магнитная индукция  $d\vec{B}$  которого определяется формулой

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

где  $\mu_0$  магнитная постоянная;  $\mu$  магнитная проницаемость среды;  $\vec{r}$  радиус-вектор, проведённый от элемента  $d\vec{l}$  до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Модуль вектора

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

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

Направление вектора  $d\vec{B}$  перпендикулярно векторам  $\vec{r}$  и  $d\vec{l}$  и определяется правилом правого винта: направление вращения головки винта дает направление  $d\vec{B}$ , если поступательное движение винта соответствует направлению тока в проводнике.

Единица магнитной индукции – тесла (Тл).

Если магнитное поле создается несколькими проводниками с токами, то результирующее магнитное поле определяется как результат наложения полей от каждого проводника по принципу суперпозиции: магнитная индукция результирующего поля равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, т.е.

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

В частном случае наложение двух полей

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

а модуль магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos\alpha},$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  отдельных полей.

Магнитная индукция  $\vec{B}$  связана с напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$  (в случае однородной, изотропной среды) соотношением

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

или в вакууме

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

Единица напряженности магнитного поля – ампер на метр (А/м).

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

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{r},$$

где  $r$  – расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки поля.

Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

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

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком прямолинейного проводника (рисунок 1),

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

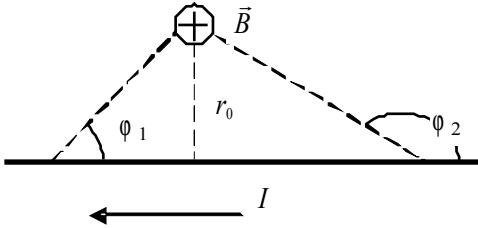


Рисунок 1 – Схема для расчета индукции магнитного поля, создаваемого отрезком проводника

Магнитное поле точечного заряда  $q$ , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью  $v$ ,

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

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и радиус-вектором;  $r$  – модуль радиус-вектора, проведённого от заряда к точке наблюдения.

ния.

**Закон Ампера.** Сила, действующая на элемент длины  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ ,

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

Модуль силы Ампера

$$dF = IB dl \sin \alpha,$$

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

Направление силы Ампера устанавливается с помощью *правила левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора индукции входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника. Сила Ампера всегда перпендикулярна проводнику и вектору индукции магнитного поля.

Сила взаимодействия двух бесконечно длинных прямолинейных параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$

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

где  $\tilde{R}$  расстояние между проводниками;  
 $d\tilde{l}$  длина отрезка проводника.

Два параллельных проводника с токами одинакового направления притягиваются, с токами противоположного направления – отталкиваются.

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

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \quad \text{или для модуля} \quad M = p_m B \sin \alpha,$$

где  $\vec{p}_m$  магнитный момент контура площадью  $S$  с током  $I$ ,

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

где  $\vec{n}$  единичный вектор нормали к плоскости контура;  $\alpha$  угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$ .

Сила Лоренца, действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$\vec{F} = q [\vec{v} \times \vec{B}], \quad \text{или для модуля} \quad F = |q|vB \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля.

Сила Лоренца перпендикулярна векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Ее направление определяется с помощью того же *правила левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы составляющая вектора индукции, перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Лоренца, действующей на заряд.

Холловская поперечная разность потенциалов

$$\Delta\phi = \frac{1}{en} \frac{IB}{d},$$

где  $\tilde{I}$  сила тока;  $\tilde{B}$  магнитная индукция;  $\tilde{d}$  толщина пластинки;  $\tilde{n}$  концентрация носителей заряда.

**Закон полного тока для магнитного поля в вакууме** (теорема о циркуляции вектора магнитной индукции)



$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k,$$

где  $d\vec{l}$  – вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура;  $B_l$  – составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной контура  $L$  произвольной формы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\sum_{k=1}^n I_k$  – алгебраическая сумма токов, охватываемая контуром.

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

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

Магнитная индукция поля внутри тороида (в вакууме)

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}.$$

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

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS,$$

где  $B_n$  – проекция вектора магнитной индукции на направление нормали к площадке  $dS$ .

Магнитный поток через плоский контур площадью  $S$  в случае:

а) неоднородного поля –

$$\Phi_B = \int_S B_n dS;$$

б) однородного поля –

$$\Phi_B = B_n S = BS \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором нормали к плоскости контура и вектором магнитной индукции;  $B_n$  – проекция вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура.

Потокоцепление, т.е. полный магнитный поток, сцепленный со всеми  $N$  витками соленоида или тороида,

$$\Psi = N\Phi_B,$$

где  $\Phi_B$  – магнитный поток через один виток.

Для соленоида

$$\Psi = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S.$$

Работа по перемещению проводника с током  $I$  в магнитном поле

$$A = I\Delta\Phi_B,$$

где  $\Delta\Phi_B$  – магнитный поток, пересечённый движущимся проводником.

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$A = I\Delta\Psi,$$

где  $I$  – сила тока в контуре;  $\Delta\Psi$  – изменение потокосцепления контура.

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = - N \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d\Psi}{dt},$$

где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции;  $N$  – число витков контура.

Частные случаи применения закона электромагнитной индукции:

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

$$\varepsilon_i = BNS \sin \omega t;$$

б) разность потенциалов  $U$  на концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$U = Blv \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля.

Величина электрического заряда  $q$ , протекающего в контуре,

$$q = \frac{\Delta\Psi}{R},$$

где  $\Delta\Psi$  – изменение потокосцепления;  $R$  – сопротивление контура.

ЭДС самоиндукции, возникающая в замкнутом контуре при изменении силы тока в нём,

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

где  $\tilde{L}$  индуктивность контура.

Потокосцепление контура индуктивностью  $L$  с током  $I$

$$\Psi = LI.$$

Индуктивность соленоида (тороида)

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

где  $\tilde{N}$  число витков соленоида;  $\tilde{S}$  площадь его поперечного сечения;  $\tilde{l}$  длина соленоида.

При вычислениях индуктивности соленоида с ферромагнитным сердечником по приведенной формуле для определения магнитной проницаемости следует предварительно использовать график зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  (рисунок 2), а затем воспользоваться формулой

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Мгновенное значение силы тока в цепи при размыкании и при замыкании цепи

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L} t\right); \quad I = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right)\right),$$

где  $\tilde{I}_0$  сила тока в цепи при  $t = 0$ ;  $\tilde{R}$  активное сопротивление цепи;  $\tilde{L}$  индуктивность цепи;  $\tilde{\varepsilon}$  ЭДС источника тока.

Энергия магнитного поля, связанного с контуром индуктивностью  $L$ , по которому течёт ток силой  $I$ ,

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

Объёмная плотность энергии однородного магнитного поля

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

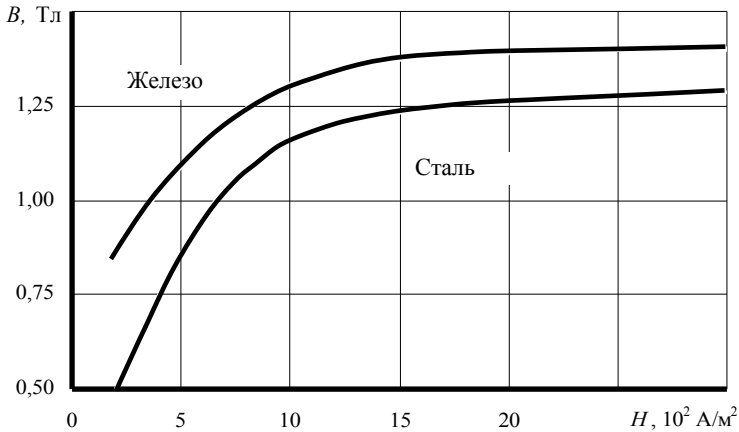


Рисунок 2 – Зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетиках от напряженности внешнего магнитного поля  $H$

Связь орбитального магнитного  $\vec{P}_m$  и орбитального  $\vec{L}_e$  механического моментов электрона:

$$\vec{P}_m = -g \vec{L}_e,$$

где  $g = e/(2m)$  – гиромагнитное отношение орбитальных моментов.

Намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{P}_m}{V},$$

где  $\vec{P}_m$  – магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных молекул в единице объема вещества.

Связь между намагниченностью и напряженностью магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H},$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества.

Связь между векторами  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{J}$  :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}).$$

Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью вещества:

$$\mu = 1 + \chi.$$

**Закон полного тока для магнитного поля в веществе** (теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля в веществе):

$$\oint_L \vec{H} dl = I,$$

где  $\vec{I}$  алгебраическая сумма сил токов проводимости, охватываемых контуром  $L$ .

## КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Уравнение гармонического колебательного движения

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_1),$$

где  $s$  – смещение колеблющейся величины от положения равновесия в момент времени  $t$  (рисунок 3);  $A$  – амплитуда (максимальное значение смещения);  $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi\nu$  – собственная круговая (циклическая) частота;  $t$  – текущее время;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $\varphi_1 = \varphi_0 + \pi/2$ ;  $T$  – период колебаний;  $\nu$  – частота колебаний.

Связь между периодом и частотой колебаний:

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Скорость точки, совершающей колебания (проекция на ось движения),

$$v_s = \frac{ds}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right),$$

и ее ускорение (проекция на ось движения)

$$a_s = \frac{dv_s}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi).$$

Амплитуда (максимальное значение) первой производной от смещения ("скорости" колебаний точки)  $A' = \omega_0 A$ .

Амплитуда (максимальное значение) второй производной от смещения ("ускорения" колебаний)

$$A'' = \omega_0^2 A.$$

Начальная фаза первой производной от смещения

$$\varphi_0 + \frac{\pi}{2}.$$

Начальная фаза второй производной от смещения

$$\varphi_0 + \pi.$$

Дифференциальное уравнение гармонических колебаний

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0.$$

Сила (проекция на ось движения), под действием которой тело массой  $m$  совершает гармонические колебания,

$$F_s = ma_s = m \frac{d^2s}{dt^2} = -mA\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -ks,$$

где  $k = m\omega_0^2$  – коэффициент упругой или квазиупругой силы.

Период колебаний точки, совершающей колебания под действием упругой силы (пружинный маятник),

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

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где  $l$  – длина маятника;  $g$  – ускорение свободного падения.

Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl_C}} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{\text{пр}}}{g}},$$

где  $J$  – момент инерции маятника относительно его оси вращения;  $m$  – масса маятника;  $l_C$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести;  $L_{\text{пр}} = \frac{J}{ml_C}$  – приведенная длина физического маятника.

Кинетическая энергия тела, участвующего в механических колебаниях,

$$W_k = \frac{mV^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0);$$

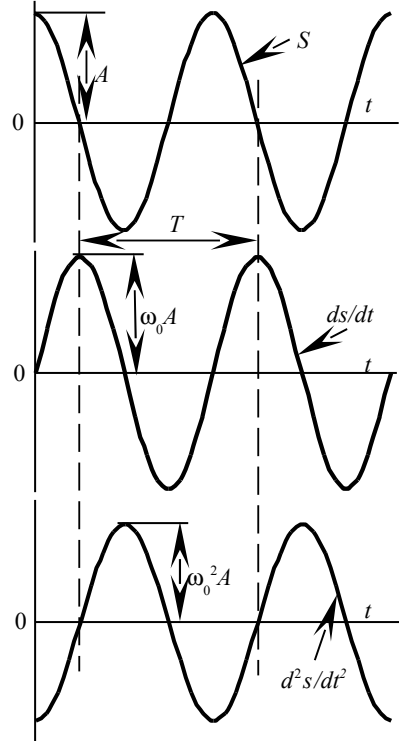
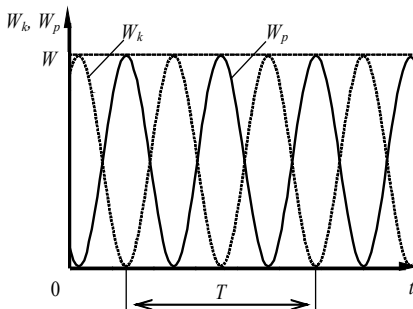


Рисунок 3 – График гармонических колебаний



потенциальная энергия

Рисунок 4 – Энергия точки при гармонических колебаниях

$$W_p = \frac{ks^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Полная энергия механических колебаний (рисунок 4)

$$W = W_k + W_p = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}.$$

Период колебаний в идеальном колебательном контуре (формула Томсона)

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где  $L$  – индуктивность катушки;  $C$  – емкость конденсатора.

Энергия электрического поля в конденсаторе при электромагнитных колебаниях в контуре

$$W_{эл} = \frac{q^2}{2C} = \frac{Lq_{\max}^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $q$  – заряд на обкладке конденсатора;  $q_{\max}$  – его максимальное значение.

Энергия магнитного поля в катушке при электромагнитных колебаниях в контуре

$$W_m = \frac{Li^2}{2} = \frac{Lq_{\max}^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $i$  – сила тока в контуре.

Полная энергия электромагнитных колебаний

$$W = W_{\text{эл}} + W_{\text{м}} = \frac{Lq_{\text{max}}^2 \omega_0^2}{2}.$$

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинаковой частоты (рисунок 5) получается гармоническое колебание той же частоты с амплитудой

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}$$

и с начальной фазой

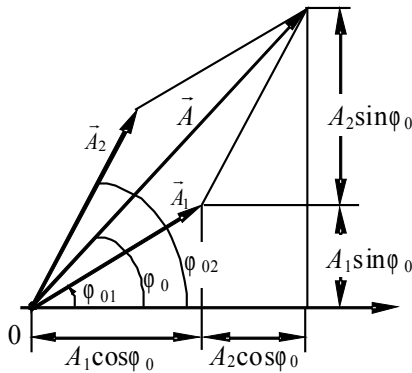


Рисунок 5 – Сложение колебаний одинакового направления

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{01} + A_2 \cos \varphi_{02}},$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды складываемых колебаний;  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$  – их начальные фазы.

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний с близкими частотами получается квазигармоническое колебание, так называемые биения (рисунок 6). Уравнение биений (при равных амплитудах складываемых колебаний)

$$s = 2A \cos\left(\frac{\Delta \omega}{2} t\right) \cos(\omega t),$$



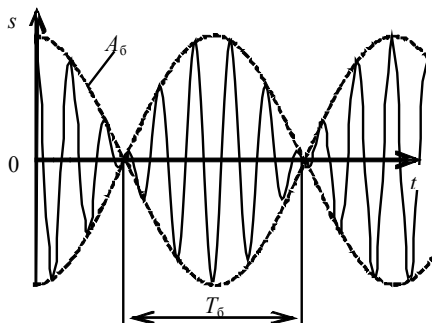


Рисунок 6 – График биений. Пунктирная линия – изменение амплитуды биений

где  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \ll \omega$  – разность частот колебаний;  $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \omega$  – частоты складываемых колебаний.

Амплитуда и период биений (период относительно медленного изменения амплитуды квазигармонических колебаний), образующихся при сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми амплитудами и близкими частотами,

$$A_{\text{б}} = 2A \left| \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2} t\right) \right|, \quad T_{\text{б}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}.$$

При сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний (вдоль осей  $x$  и  $y$ ) одинакового периода уравнение траектории результирующего движения имеет вид (рисунок 7):

$$\begin{aligned} x^* &= A_1 |\sin(\varphi_{02} - \varphi_{01})|, \\ y^* &= A_2 |\sin(\varphi_{02} - \varphi_{01})| \end{aligned}$$

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01}) = \sin^2(\varphi_{02} - \varphi_{01}).$$

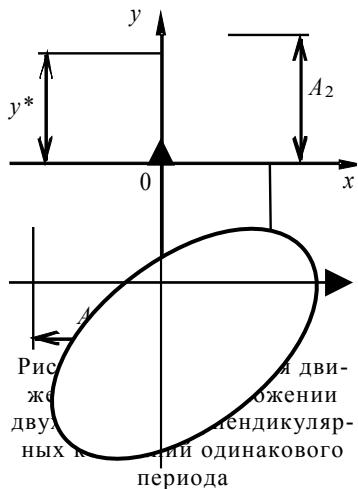


Рисунок 7 – Траектория движения результирующего движения двух взаимно перпендикулярных колебаний одинакового периода

Дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\beta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0,$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания.

Для колебаний груза на пружине

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

где  $r$  – коэффициент сопротивления.

Условие существования затухающих колебаний:

$$\beta < \omega^0.$$

Уравнение затухающих колебаний (рисунок 8)

$$s = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $A_0$  – начальное значение амплитуды колебаний;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  – циклическая частота затухающих колебаний.

Амплитуда затухающих колебаний

$$A = A_0 \exp(-\beta t)$$

Логарифмический декремент затухания

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

Связь логарифмического декремента затухания с периодом квазигармонических затухающих колебаний

$$\theta = \beta T.$$

Условие слабозатухающих колебаний

$$\beta \ll \omega^0.$$

Добротность колебательной системы

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)},$$

где  $W(t)$  – энергия системы в момент времени  $t$ ;  $[W(t) - W(t+T)]$  – средняя потеря энергии за один период.

Связь добротности с другими параметрами квазигармонических слабозатухающих колебаний:

$$Q \approx \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e,$$

где  $N_e$  – число полных колебаний, соответствующее времени уменьшения амплитуды в  $e$  раз.

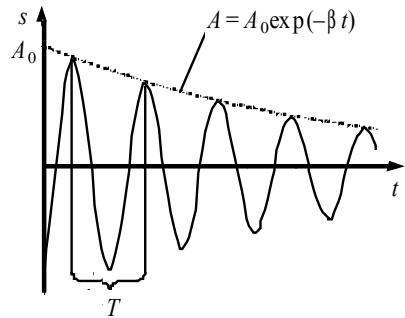


Рисунок 8 – График затухающих колебаний

Для слабозатухающих колебаний груза на пружине  $Q = \frac{1}{r} \sqrt{km}$  ;  
 для электрического контура  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$  (величина  $R_b = \sqrt{\frac{L}{C}}$  назы-  
 вается волновым сопротивлением).

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\beta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = f_m \cos \Omega t ,$$

где  $f_m$  – амплитудная характеристика периодического внешнего воз-  
 действия;  $\Omega$  – его циклическая частота. Для колебаний груза на пружи-

не  $f_m = \frac{F_m}{m}$  ; для электромаг-

нитных колебаний в контуре

$f_m = \frac{U_m}{L}$  , где  $F_m$  – амплитуда

внешней силы;  $U_m$  – амплитуда

напряжения генератора.

Установившееся решение  
 дифференциального уравнения  
 вынужденных колебаний

$$s = A \cos(\Omega t - \varphi) ,$$

где  $A$  – амплитуда вынужденных  
 колебаний (рисунок 9);  $\varphi$  – раз-  
 ность фаз между периодическим внешним воздействием и смещени-  
 ем.

Амплитуда вынужденных колебаний

$$A = \frac{f_m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} .$$

Разность фаз между периодическим внешним воздействием и смещением (рисунок 10)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta \Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} .$$

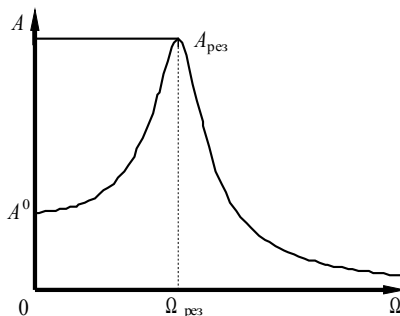


Рисунок 9 – Зависимость амплитуды  
 вынужденных колебаний от частоты  
 внешнего воздействия

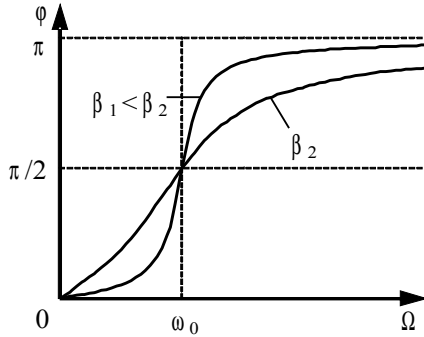


Рисунок 10 – Зависимость разности фаз между периодическим внешним воздействием и смещением от частоты

Первая резонансная частота (частота внешнего воздействия, при которой амплитуда вынужденных колебаний принимает максимальное значение)

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

Связь резонансной амплитуды смещения (амплитуды для первой резонансной частоты  $A_{\text{рез}}$ ) и амплитуды при нулевой частоте  $A_0$

$$\frac{A_{\text{рез}}}{A^0} = Q.$$

Амплитуда "скорости" при вынужденных колебаниях (см. рисунок 9)

$$A' = \frac{f_m}{\sqrt{\left(\frac{\omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega}\right)^2 + 4\beta^2}}.$$

Связь добротности с шириной резонансной кривой:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta \Omega},$$

где  $\Delta \Omega$  – ширина кривой на уровне  $\frac{A'_p}{\sqrt{2}}$ ;  $A'_p$  – максимальное значение амплитуды "скорости" (рисунок 11).

Зависимости мгновенных значений напряжений на резисторе ( $u_R$ ), на конденсаторе ( $u_C$ ) и на катушке ( $u_L$ ), а также силы тока ( $i$ ) в цепи от времени:

$$u_R = U_{Rm} \cos(\omega t + \varphi_0); \quad u_C = U_{Cm} \cos\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_L = U_{Lm} \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right); \quad i = I_m \cos(\omega t + \varphi_0).$$

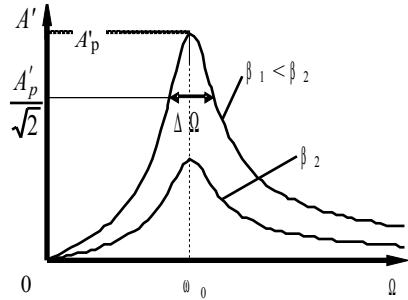


Рисунок 11 – Зависимость амплитуды "скорости" вынужденных колебаний от частоты внешнего воздействия

Связь амплитуды напряжения на резисторе и амплитуды силы тока:

$$U^{Rm} = RI^m.$$

Связь амплитуды напряжения на конденсаторе и амплитуды силы тока:

$$U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega C}.$$

Связь амплитуды напряжения на катушке и амплитуды силы тока:

$$U^{Lm} = \omega LI^m.$$

Связь между амплитудами и фазами напряжений и силы тока наглядно представляется на диаграмме напряжений переменного тока (рисунок 12).

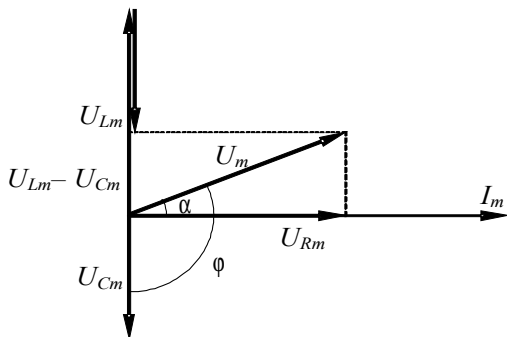


Рисунок 12 – Диаграмма напряжений переменного тока

Емкостное сопротивление

$$R_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Индуктивное сопротивление

$$R^L = \omega L.$$

Полное сопротивление цепи переменного тока

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

**Закон Ома для переменного тока**

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}},$$

где  $I_m$  и  $U_m$  – амплитудные значения силы тока и напряжения;  $\omega$  – циклическая частота переменного тока.

Сдвиг фаз между напряжением и силой переменного тока

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Мгновенное значение мощности переменного тока

$$P(t) = U(t)I(t) = I_m U_m \left( \cos^2 \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi \right),$$

где  $U(t) = U^m \cos \omega t$ ,  $I(t) = I^m \cos(\omega t - \varphi)$ .

Среднее значение мощности за период колебаний:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi = \frac{1}{2} R I_m^2.$$

Такую же мощность развивает постоянный ток  $I = I_m \sqrt{2}$ .

Величины  $I = I_m \sqrt{2}$  и  $U = U_m \sqrt{2}$  называются соответственно действующими значениями тока и напряжения. Тогда

$$\langle P \rangle = IU \cos \varphi,$$

где множитель  $\cos \varphi$  называется коэффициентом мощности.

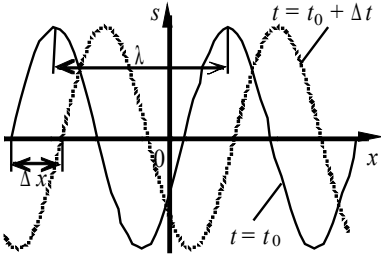


Рисунок 13 – График плоской одномерной бегущей волны  $\Delta x = v_\phi \Delta t$

Уравнение плоской (одномерной) бегущей гармонической волны (рисунок 13)

$$s = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где  $s$  – смещение колеблющихся точек;  $A$  – амплитуда (максимальное значение смещения);  $\omega$  – круговая частота;  $t$  – время;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $x$  – координата точки;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Уравнение плоской гармонической волны, распространяющейся в произвольном направлении,

$$s = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0) = A \cos(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z + \varphi_0),$$

где  $\vec{k}$  – волновой вектор (по модулю равный волновому числу и определяющий направление распространения волны).

Фазовая скорость волны

$$v_\phi = \omega/k = \lambda/T.$$

Волновое уравнение в трехмерном случае

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = v_{\Phi}^2 \Delta s,$$

где  $\Delta s$  – оператор Лапласа от смещения.

Волновое уравнение в одномерном случае

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = v_{\Phi}^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}.$$

Общее решение волнового уравнения в одномерном случае

$$s = f_1(x - v_{\Phi}t) + f_2(x + v_{\Phi}t),$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – произвольные функции.

Групповая скорость и ее связь с фазовой

$$v_{гр} = \frac{d\omega}{dk} = v_{\Phi} - \lambda \frac{dv_{\Phi}}{d\lambda}.$$

Уравнение одномерной стоячей волны, образующейся при наложении двух встречных бегущих гармонических волн с одинаковыми амплитудами (рисунок 14),

$$y = 2A \cos(\omega t) \cos(kx),$$

где  $A$  – амплитуды двух встречных плоских бегущих гармонических волн, при интерференции которых образуется стоячая волна;  $\omega$  и  $k$  – соответственно их круговые частоты и волновые числа.

Амплитуда стоячей волны

$$A_{ст} = 2A |\cos(kx)|.$$

Расстояние между соседними узлами (расстояние между соседними пучностями)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}.$$

Скорость звука в газе

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}},$$

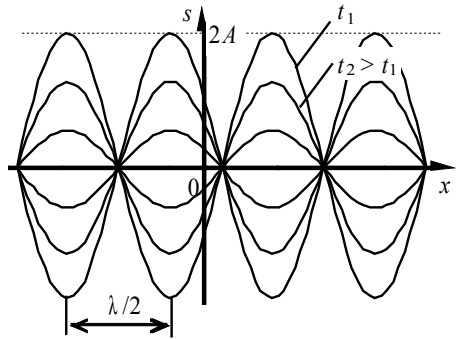


Рисунок 14 – График стоячей волны



где  $\gamma$  – постоянная адиабаты;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $\mu$  – молярная масса газа.

Скорость упругих продольных волн в твердом теле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность вещества. Для поперечных волн скорость задается аналогичным выражением с заменой модуля Юнга на модуль сдвига соответствующего материала.

Объемная плотность энергии упругой бегущей гармонической волны

$$w = \rho \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где  $\rho$  – плотность вещества.

Плотность потока энергии упругой волны

$$j = \rho v_{\phi} \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t - kx + \varphi_0).$$

Интенсивность упругой волны

$$I = \frac{1}{2} \rho v_{\phi} \omega^2 A^2.$$

Волновое уравнение для плоской электромагнитной волны

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2},$$

где  $E_y$  – проекция напряженности электрической составляющей на ось  $y$  (рисунок 15);  $\epsilon, \mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;  $\epsilon_0, \mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные.

Фазовая скорость электромагнитной волны

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n},$$

где  $n$  – показатель преломления среды.

В плоской электромагнитной волне модули напряженностей связаны соотношением

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} |\vec{E}| = \sqrt{\mu_0 \mu} |\vec{H}|,$$

где  $\vec{E}, \vec{H}$  – напряженности электрического и магнитного полей.

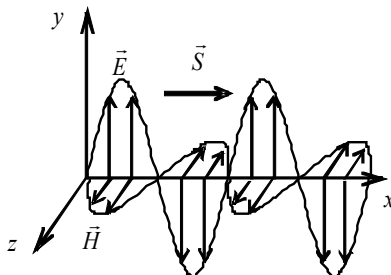


Рисунок 15 – Плоская электромагнитная волна

Объемная плотность энергии электромагнитной волны

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2} = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0} EH.$$

Плотность потока энергии электромагнитного поля (вектор Пойнтинга) (рисунок 16)

$$\vec{\Pi} = [\vec{E}\vec{H}].$$

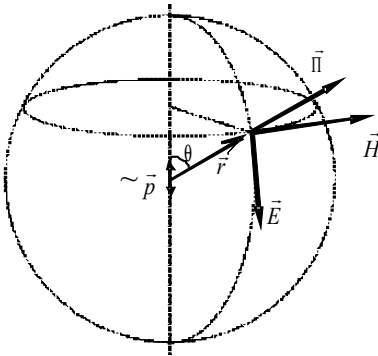


Рисунок 16 – Дипольное излучение

Зависимость амплитуд дипольного излучения от расстояния (рисунок 14)

$$E_m \sim H_m \sim \frac{1}{r},$$

где  $E_m$  и  $H_m$  – амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей соответственно;  $r$  – расстояние от излучающего диполя.

Зависимость амплитуды дипольного излучения от угла

$$E_m \sim H_m \sim \sin \theta,$$

где  $\theta$  – угол между направлением излучения и осью диполя.

Зависимость мощности излучения от ускорения заряда

$$P \sim a_m^2,$$

где  $a_m$  – ускорение заряда (при колебаниях – максимальное значение ускорения).

## ОПТИКА

Оптическая длина пути световой волны

$$L = \int_0^l n(x) dx,$$

где  $l$  – геометрическая длина пути;  $n(x)$  – зависимость показателя преломления от координаты вдоль луча. Для случая  $n = \text{const}$  (однородное) вещество  $L = nl$ .

Разность фаз двух когерентных волн

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

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

Условие максимального усиления света при интерференции:

– для разности фаз –

$$\Delta\varphi = \pm 2k\pi \quad (k = 0; 1; 2; \dots);$$

– для оптической разности хода –

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (k = 0; 1; 2; \dots),$$

где  $\lambda$  – длина волны света в среде, в которой происходит интерференция.

Условие максимального ослабления света при интерференции:

– для разности фаз –

$$\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi \quad (k = 0; 1; 2; \dots);$$

– для оптической разности хода –

$$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 0; 1; 2; \dots).$$

Оптическая разность хода двух световых волн от вторичных источников (щелей) до экрана в опыте Юнга

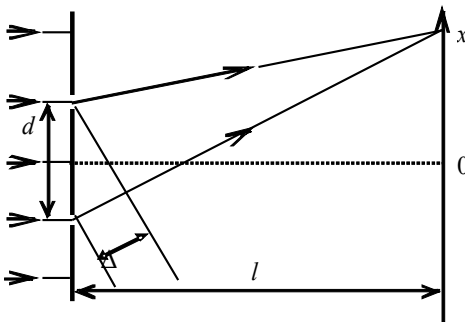


Рисунок 17 – Ход лучей в опыте Юнга

$$\Delta = \frac{xd}{l},$$

где  $x$  – координата точки на экране, отсчитываемая от его центра;  $d$  – расстояние между щелями;  $l$  – расстояние от щелей до экрана (рисунок 17).

Расстояние между соседними светлыми интерференционными полосами на экране (ширина темной полосы) – расстояние между соседними

точками, которым соответствуют максимумы освещенности; расстояние между соседними темными интерференционными полосами на экране (ширина светлой полосы) – расстояние между соседними точками, которым соответствуют минимумы освещенности,

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}.$$

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от двух поверхностей тонкой пленки и сведении соответствующих лучей в одну точку экрана:

– в случае, когда  $n_1 < n$ ,  $n_2 < n$  или  $n_1 > n$ ,  $n_2 > n$ ,

$$\Delta = 2dn \cos i_2 \pm \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i_1} \pm \frac{\lambda}{2},$$

где  $d$  – толщина пленки;  $n$  – показатель преломления вещества пленки;  $i_2$  – угол преломления света в пленке;  $n_1, n_2$  – показатели преломления сред соответственно над и под пленкой;  $i_1$  – угол падения (рисунок 18);

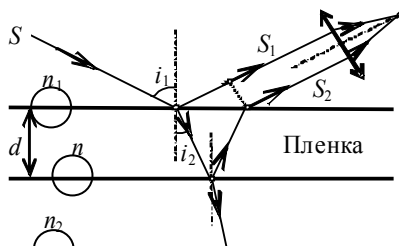


Рисунок 18 – Ход лучей при интерференции в тонкой пленке

– в случае, когда  $n_1 < n$ ,  $n_2 > n$

или  $n_1 > n$ ,  $n_2 < n$ ,

$$\Delta = 2dn \cos i_2 = 2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i_1}.$$

Для проходящих лучей света оптическая разность хода изменяется наполовину длины волны.

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \quad (k = 0; 1; 2; \dots),$$

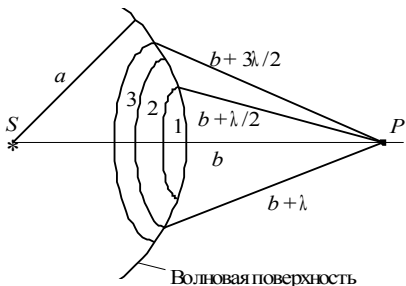


Рисунок 19 – Построение зон Френеля на сферической волновой поверхности

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

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

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

Радиус зоны Френеля с номером  $m$  (рисунок 19)

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

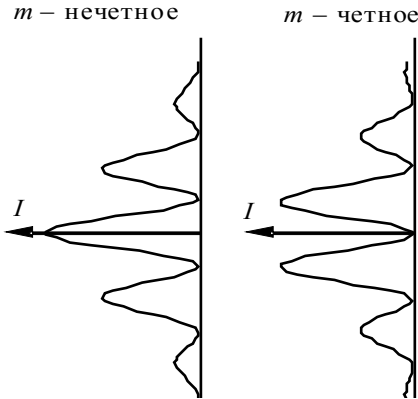


Рисунок 20 – Распределение интенсивности света по экрану при дифракции Френеля на круглом отверстии

где  $a$  – расстояние от источника света (точка  $S$  на рисунке 19) до волновой поверхности;  $b$  – расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения (точка  $P$ ).

Для плоской световой волны ( $a \rightarrow \infty$ )  $r_m = \sqrt{mb\lambda}$ .

Математическое условие дифракции Френеля

$$\frac{R^2}{b\lambda} \sim 1.$$

Математическое условие дифракции Фраунгофера

$$\frac{R^2}{b\lambda} \ll 1.$$

При дифракции Френеля на круглом отверстии в центре экрана будет наблюдаться максимум интенсивности света, если отверстие открывает нечетное число зон Френеля ( $m$  на рисунке 20); минимум, если – четное.

При дифракции Фраунгофера на одной щели (нормальное падение) условие минимумов (рисунок 21):

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda \quad (k = 1; 2; \dots),$$

где  $a$  – ширина щели;  $\varphi$  – угол дифракции;  $k$  – порядок минимума;  $\lambda$  – длина волны.

Условие максимумов

$$a \sin \varphi' = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1; 2; \dots),$$

где  $\varphi'$  – приближенное значение угла дифракции;  $k$  – порядок максимума.

При дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке (нормальное падение) условие главных максимумов (рисунок 22)

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

где  $d$  – период решетки;  $\varphi$  – угол дифракции;  $k$  – порядок максимума (спектра).

Условие главных минимумов совпадает с условием минимумов для дифракции на одной щели.

Условие дополнительных минимумов:

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

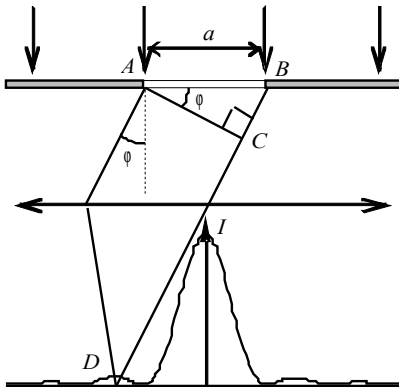


Рисунок 21 – Дифракция Фраунгофера на одной щели и распределение интенсивности света по экрану

где  $N$  – общее число щелей решетки. Между двумя главными максимумами располагаются  $N - 1$  дополнительных минимумов.

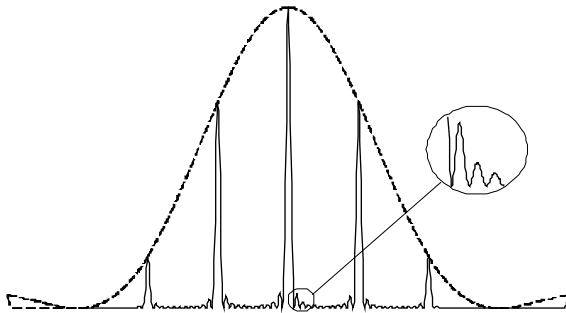


Рисунок 22– Распределение интенсивности света по экрану при дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке ( $N = 12$ ;  $d/a = 3$ ). Пунктирная кривая соответствует интенсивности от одной щели, умноженной на  $N^2$

Разрешающая способность оптического прибора

$$R = \frac{1}{\Delta \varphi} ,$$

где  $\Delta \varphi$  – наименьшее угловое расстояние между двумя светлыми точками, при котором их изображения в фокальной плоскости объектива могут быть видны раздельно.

Разрешающая способность объектива

$$R = \frac{D}{1,22\lambda} ,$$

где  $D$  – диаметр объектива.

Частота, воспринимаемая приемником при относительном движении источника и приемника сигнала (эффект Доплера),

$$\nu = \nu_0 \frac{\nu_x - \nu_{пр,x}}{\nu_x - \nu_{ист,x}} ,$$

где  $\nu_0$  – частота сигнала, испускаемая источником;  $\nu_x$ ,  $\nu_{пр,x}$  и  $\nu_{ист,x}$  – соответственно проекции скоростей распространения сигнала (скорости волны), движения источника и движения приемника на ось, проходящую через источник и приемник (ось  $x$ ). Все скорости рассматриваются в системе отсчета, связанной со средой, по которой распространяются волны.

Частота, воспринимаемая приемником при продольном эффекте Доплера для электромагнитных волн в вакууме (относительная ско-

рость источника и приемника направлена вдоль соединяющей их прямой),

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{v}{c}} / \sqrt{1 + \frac{v}{c}},$$

где  $v$  – относительная скорость источника электромагнитных волн и их приемника;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме.

Частота, воспринимаемая приемником при поперечном эффекте Доплера для электромагнитных волн (относительная скорость источника и приемника направлена перпендикулярно соединяющей их прямой),

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Формула Вульфа-Брэгга (рисунок 23)

$$2d \sin \vartheta = k\lambda,$$

где  $d$  – расстояние между атомными плоскостями кристалла;  $\vartheta$  – угол

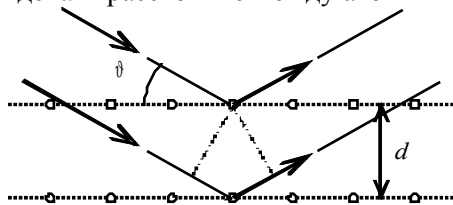


Рисунок 23 – Ход лучей при отражении от атомных плоскостей кристалла

скольжения (угол между направлением пучка параллельных лучей, падающих на кристалл, и гранью кристалла), определяющий направление, для которого имеет место дифракционный максимум при зеркальном отражении лучей от атомных плоскостей;  $k$  – порядок максимума.

Излучение Вавилова-Черенкова происходит под углом, определяемым соотношением

$$\cos \vartheta = \frac{c}{nv},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $n$  – показатель преломления среды;  $v$  – скорость движения заряженной частицы.



**Закон Брюстера:** луч, отраженный от границы раздела двух диэлектриков, полностью поляризован, если угол падения удовлетворяет условию (рисунок 24)

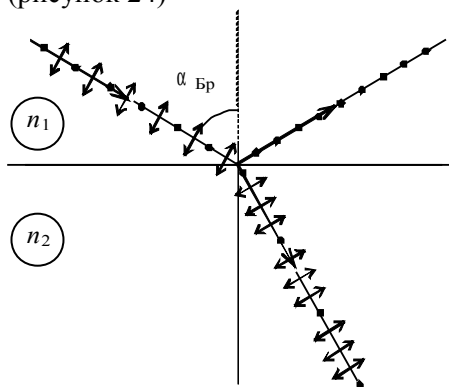


Рисунок 24 – Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{21},$$

где  $n_{21} = n_2/n_1$  – относительный показатель преломления второго диэлектрика относительно первого.

**Закон Малюса:** интенсивности плоскополяризованных лучей света, соответственно падающего на анализатор (поляризатор) ( $I_0$ ) и прошедшего через него ( $I$ ), связаны соотношением (рисунок 25)

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

где  $\varphi$  – угол между плоскостями пропускания (поляризации) лучей света. Здесь предполагается отсутствие поглощения света в анализаторе.

Следствие закона Малюса для падения на анализатор естественного света

$$I = \frac{1}{2} I_0.$$

Степень поляризации света

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

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

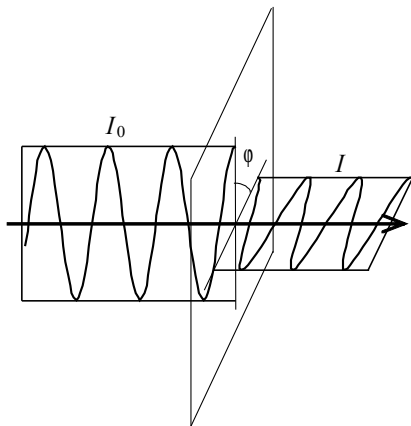


Рисунок 25 – Поворот плоскости поляризации света  
– для растворов –

Угол поворота плоскости поляризации оптически активных веществ:

– для кристаллов и чистых жидкостей –

$$\varphi = \alpha d;$$

$$\varphi = \alpha_1 C d,$$

где  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  – коэффициенты удельного вращения;  $d$  – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;  $C$  – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Закон Бугера для поглощения света

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где  $I$  – интенсивность света в точке, находящейся на расстоянии  $x$  от границы вещества;  $I_0$  – интенсивность света в точке на границе вещества (падающий свет);  $\alpha$  – коэффициент поглощения.

Излучательность тела (энергетическая светимость)

$$R_3 = \frac{dE}{dt \cdot dS},$$

где  $dE$  – энергия электромагнитных волн, излучаемая за время  $dt$  с поверхности площадью  $dS$ .

Связь мощности излучения (потока энергии) с излучательностью при  $R_3 = \text{const}$ :

$$P = R_3 S,$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности тела.

Спектральная плотность излучательности (испускабельная способность) (по частоте и длине волны)

$$r_\nu = \frac{dE[\nu \div (\nu + d\nu)]}{dt \cdot dS \cdot d\nu}, \quad r_\lambda = \frac{dE[\lambda \div (\lambda + d\lambda)]}{dt \cdot dS \cdot d\lambda},$$

где  $dE[\nu \div (\nu + d\nu)]$  и  $dE[\lambda \div (\lambda + d\lambda)]$  – энергия электромагнитных волн, излучаемая в узком спектральном интервале  $d\nu$  ( $d\lambda$ );  $\nu$  – частота излучения;  $\lambda$  – длина волны.

Связь излучательности с испускабельной способностью:

$$R_\nu = \int_0^\infty r_\nu d\nu = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda,$$

Связь испускабельных способностей по частоте и по длине волны:

$$r_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} r_\nu.$$

Поглощательная способность

$$a_\nu = \frac{dE_{\text{погл}}(\nu)}{dE_{\text{пад}}(\nu)},$$

где  $dE_{\text{погл}}$  – поглощенная энергия;  $dE_{\text{пад}}$  – энергия падающего излучения (в узком спектральном интервале за малое время на поверхность малой площади).

Для серого тела  $a_\nu = \text{const}$ , а для абсолютно черного тела  $a_\nu = 1$ .

**Закон излучения Кирхгофа:**

$$\frac{r_\nu}{a_\nu} = f(\nu, T) = r_\nu^*,$$

где  $f(\nu, T)$  – универсальная функция частоты и абсолютной температуры ( $T$ );  $r_\nu^*$  – испускабельная способность абсолютно черного тела.

Связь излучательности (энергетической светимости) абсолютно черного тела с его абсолютной температурой (**закон Стефана-Больцмана**):

$$R_\nu^* = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана.

Следствие закона Стефана-Больцмана для нечерного тела:

$$R_\nu = \alpha \sigma T^4.$$

Длина волны, при которой испускательная способность абсолютно черного тела  $r_{\nu}^*$  принимает максимальное значение (рисунок 26), связана с абсолютной температурой (**закон смещения Вина**):

$$\lambda_m T = b,$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м·К – первая постоянная Вина.

Максимальное значение испускательной способности абсолютно черного тела пропорционально пятой степени абсолютной тем-

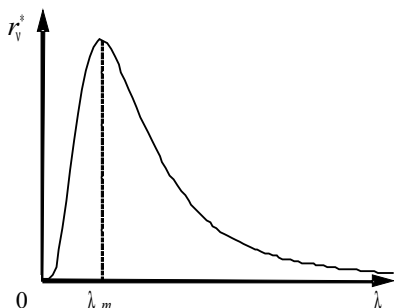


Рисунок 26 – Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны

пературы:

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

где  $C = 1,29 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м<sup>3</sup>·К<sup>5</sup>) – вторая постоянная Вина.

**Формула Рэлея–Джинса** (выражение для испускательной способности абсолютно черного тела, полученное с помощью фундаментальных положений классической физики):

$$r_{\nu}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $c$  – скорость света в вакууме.

Энергия, соответствующая кванту излучения,

$$\epsilon_{\nu} = h\nu.$$

**Формула Планка** (выражение для испускательной способности

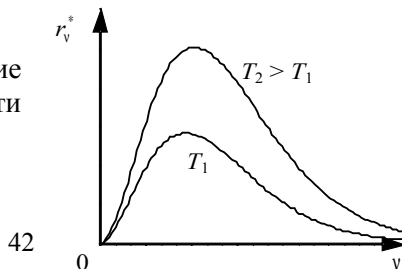


Рисунок 27 – График  $r_{\nu}^*$  по формуле Планка

абсолютно черного тела, полученное с помощью гипотезы Планка, – рисунок 27):

$$r_{\nu}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Энергия фотона

$$\varepsilon_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega,$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ; эта величина также называется постоянной Планка;  $\omega = 2\pi\nu$

– циклическая частота излучения.

Импульс фотона

$$p_{\gamma} = \frac{\varepsilon_{\gamma}}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Масса фотона

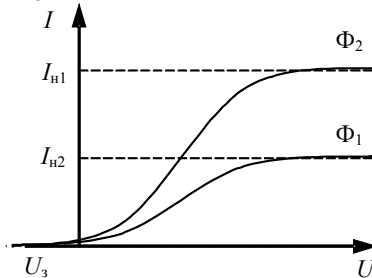


Рисунок 28 – Вольтамперная характеристика внешнего фотоэффекта

$$m_{\gamma} = \frac{\varepsilon_{\gamma}}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

Связь максимальной скорости вылетающих при внешнем фотоэффекте электронов (фотоэлектронов) с задерживающим напряжением (рисунок 28):

$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = eU_3,$$

где  $m$  – масса электрона;  $v_{\max}$  – максимальная скорость;  $e$  – заряд электрона по абсолютной величине (элементарный заряд);  $U_3$  – задерживающее напряжение.

Связь силы тока насыщения со световым потоком:

$$I_{\text{н}} \sim \Phi ,$$

где  $I_{\text{н}}$  – сила тока насыщения (остающаяся постоянной при увеличении приложенного напряжения);  $\Phi$  – падающий на катод световой поток (на рисунке 5 сила тока насыщения  $I_{\text{н1}}$  соответствует световому потоку  $\Phi_1$ , а  $I_{\text{н12}}$  – соответственно  $\Phi_2$ ).

**Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:**

$$h\nu = A + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2} ,$$

где  $A$  – работа выхода электрона из металла.

Соотношения для красной границы фотоэффекта:

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

где  $\nu_0$  – минимальная частота света;  $\lambda_0$  – максимальная длина волны света, при которых еще возможен фотоэффект.

Изменение длины волны излучения при комптоновском рассеянии (рисунок 29)

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} ,$$

где  $\lambda$  – длина волны фотона, налетающего на свободный или слабо связанный электрон;  $\lambda'$  – длина волны фотона, рассеянного на угол

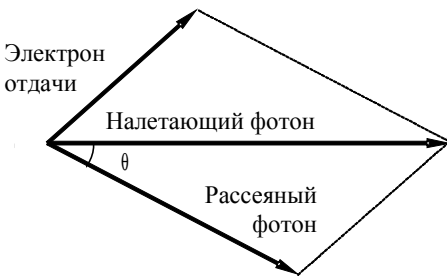


Рисунок 29 – Эффект Комптона

$\theta$  после столкновения с электроном;  $m_0$  – масса покоя электрона.

Величина

$$\lambda = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

называется комптоновской длиной волны электрона.

Энергетическая освещенность

$$E_s = \frac{dE_{\text{пад}}}{dt \cdot dS} ,$$

где  $dE_{\text{пад}}$  – энергия электромагнитных волн, падающих за время  $dt$  на поверхности площадью  $dS$ .

Давление света при его нормальном падении на поверхность

$$p = w(1 + \rho) = \frac{E_{\dot{y}}}{c}(1 + \rho),$$

где  $w$  – объемная плотность энергии излучения;  $\rho$  – коэффициент его отражения от поверхности;  $c$  – скорость распространения света в вакууме.

## ФИЗИКА АТОМА И ЯДРА

Уравнение для круговых стационарных орбит по теории Бора для водородоподобных атомов (рисунок 30)

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar,$$

где  $m$  – масса электрона;  $v$  – его скорость на орбите;  $r$  – ее радиус;  $n$  – ее номер (главное квантовое число).

Связь между кинетической, потенциальной и полной энергиями электрона, движущегося в атоме по орбите с номером  $n$  (в состоянии с главным квантовым числом  $n$ ):

$$E_n^k = -E_n; \quad E_n^p = 2E_n; \quad E_n = -\frac{1}{2}E_n^p,$$

где  $E_n^k$  – кинетическая энергия электрона;  $E_n$  – его полная энергия;  $E_n^p$  – его потенциальная энергия.

Уравнение Бора для частоты излучения (поглощения)

$$\hbar\omega = h\nu = E_n - E_m,$$

где  $n$  и  $m$  – номера орбит электрона (его состояний в атоме).

Радиус  $n$ -й стационарной орбиты электрона в водородоподобном атоме

$$r_n = \frac{a_0}{Z} n^2,$$

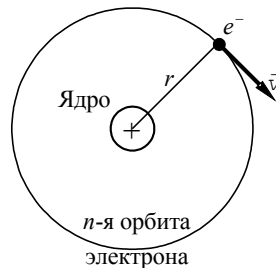


Рисунок 30 – Орбита электрона по теории Бора

где  $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$  м – первый боровский радиус (радиус первой орбиты электрона в атоме водорода);  $Z$  – номер элемента в таблице Менделеева.

Полная энергия электрона в водородоподобном атоме

$$E_n = - \frac{Z^2 E_i^H}{n^2},$$

где  $E_i^H = 13,6$  эВ – энергия ионизации атома водорода.

Зависимость энергии ионизации электрона в водородоподобном атоме от номера элемента:

$$E_i = E_i^H Z^2.$$

Сериальные формулы для частоты, циклической частоты и длины волны излучаемого (поглощаемого) водородоподобным ионом света при переходе электрона с одной орбиты на другую (переходе атома из одного состояния в другое):

$$\nu = R'_\infty Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \omega = R_\infty Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \frac{1}{\lambda} = R''_\infty Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $R'_\infty = 3,29 \cdot 10^{15}$  Гц,  $R_\infty = \frac{m_0 e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} = 2,07 \cdot 10^{16} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,

$R''_\infty = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга (данное значение соответствует бесконечно тяжелому ядру).



## Частные формулы для отдельных серий излучения атома водорода

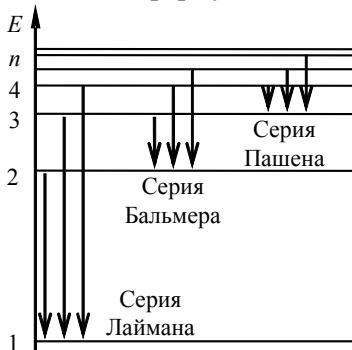


Рисунок 31 – Переходы электронов в атоме водорода и соответствующие линии

( $Z = 1$ ) соответствуют: серии Лаймана ( $m = 1, n = 2; 3; \dots$ ; описывает линии ультрафиолетового диапазона спектра); серии Бальмера ( $m = 2, n = 3; 4; \dots$ ; в основном описывает линии видимого диапазона спектра); серии Пашена ( $m = 3, n = 4; 5; \dots$ ; описывает линии инфракрасного диапазона спектра) и т. д. (рисунок 31).

Длина волны, соответствующая коротковолновой границе тормозного рентгеновского спектра,

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}.$$

**Закон Мозли для характеристического рентгеновского спектра:**

$$\omega = (Z - \sigma)^2 R_{\infty} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $\sigma$  – постоянная экранирования.

**Длина волны де Бройля** частицы, имеющей импульс  $p$ ,

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Импульс частицы  $p$  связан с ее скоростью  $v$  и кинетической энергией  $E_k$ :

– для случая малых скоростей –

$$p = m_0 v = \sqrt{2m_0 E_k};$$

– для скоростей, сравнимых по величине со скоростью света, –

$$p = m v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + E_k) E_k},$$

где  $m$  – релятивистская масса частицы;  $v$  – ее скорость;  $m_0$  – масса покоя частицы;  $E_0 = m_0 c^2$  – ее энергия покоя.

### Фазовая скорость волн де Бройля

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{E}{p},$$

где  $k$  – волновое число волн де Бройля ( $k = 2\pi/\lambda$ );  $E$  – полная энергия частицы.

### Групповая скорость волн де Бройля

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{dE}{dp}.$$

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2},$$

где  $\Delta p_x$  – неопределенность проекции импульса на ось  $Ox$ ;  $\Delta x$  – неопределенность соответствующей координаты.

Соотношение неопределенностей для энергии и времени:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где  $\Delta E$  – неопределенность энергии квазистационарного состояния;  $\Delta t$  – время нахождения квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

### Общее уравнение Шредингера для одной частицы во внешнем поле

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U\Psi,$$

где  $i$  – мнимая единица;  $\Delta \Psi$  – оператор Лапласа от волновой функции  $\Psi(x, y, z, t)$ ;  $U = U(x, y, z)$  – потенциальная энергия частицы в поле.

Зависимость волновой функции частицы в стационарном состоянии от времени

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \exp\left(-i \frac{E}{\hbar} t\right),$$

где  $\psi(x, y, z)$  – координатная часть волновой функции, описывающая стационарное состояние частицы;  $E$  – полная энергия частицы в стационарном состоянии.

**Уравнение Шредингера для стационарных состояний** (одномерный случай)

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\psi(x) = 0.$$

Плотность вероятности существования частицы в некоторой малой окрестности точки  $x$  в одномерном случае (для стационарных состояний, соответствующих ограниченному в пространстве движению)

$$\frac{dP(x)}{dx} = |\Psi(x, t)|^2 = |\psi(x)|^2,$$

где  $dP(x)$  – вероятность того, что частица находится вблизи точки с координатой  $x$  в интервале шириной  $dx$ .

Вероятность существования частицы в интервале от  $x_1$  до  $x_2$  в одномерном случае (для рассматриваемого выше случая)

$$P = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

Значения, которые может принимать главное квантовое число (электрон в атоме водорода):

$$n = 1; 2; 3; \dots$$

Энергия электрона в стационарном состоянии в атоме водорода

$$E_n = - \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}.$$

Значения, которые может принимать орбитальное квантовое число:

$$l = 0; 1; \dots; n - 1.$$

Орбитальный момент импульса электрона в атоме водорода

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

Значения, которые может принимать магнитное квантовое число:

$$m = -l; -l + 1; \dots; -1; 0; 1; \dots; l - 1; l.$$

Проекция орбитального момента импульса электрона на внешнюю ось (ось, определяемую направлением внешнего поля, чаще всего магнитного или электрического)

$$L_{l, z} = m\hbar.$$

Модуль спина (собственного, не связанного с вращательным движением момента импульса) микрочастицы

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)},$$

где  $s$  – спиновое число (для электрона  $s = 1/2$ ). Спиновое число является уникальным параметром для микрочастицы (подобно массе покоя и заряду) и может принимать целые (0; 1; 2;...) или полуцелые (1/2; 3/2; 5/2; ...) значения.

Значения, которые может принимать магнитное спиновое квантовое число:

$$m_s = -s; -s+1; \dots; s-1; s.$$

Проекция спина электрона в атоме на внешнюю ось

$$L_{s, z} = m_s\hbar.$$

Радиус ядра приближенно определяется соотношением

$$r = r_0 A^{1/3},$$

где  $r_0 \approx 1,3 \dots 1,7 \cdot 10^{-15}$  м;  $A$  – массовое число (число нуклонов в ядре).

Дефект массы ядра

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

где  $Z$  – зарядовое число (число протонов в ядре);  $m_p$  – масса протона;  $m_n$  – масса нейтрона;  $m_{\text{я}}$  – масса ядра;  $m_{\text{H}}$  – масса протия (атома водорода  ${}^1_1\text{H}$ );  $m_{\text{ат}}$  – масса нейтрального атома, соответствующего рассматриваемому ядру.

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2.$$

Во внесистемных единицах энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot k,$$

где  $E_{\text{св}}$  выражена в МэВ,  $\Delta m$  – в а.е.м.,  $k = 931,5$  МэВ/а.е.м. [1 а.е.м. (атомная единица массы) соответствует энергии покоя 931,5 МэВ].

**Закон радиоактивного распада:**

$$dN = -\lambda N dt \quad \text{или} \quad N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $dN$  – число ядер, распадающихся за интервал времени  $dt$ ;  $\lambda$  – постоянная распада;  $N$  – число ядер, не распавшихся к моменту времени  $t$ ;  $N_0$  – число ядер в начальный момент ( $t = 0$ ).

Число ядер, распавшихся за время  $t$ ,

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

Если промежуток времени  $t = \Delta t$  мал по сравнению с периодом полураспада  $T_{1/2}$ , то число распавшихся ядер приближенно можно определить следующим образом:

$$\Delta N = \lambda N \Delta t.$$

Связь периода полураспада (отрезка времени, за который распадается половина начального числа радиоактивных ядер) с постоянной распада:

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

Среднее время жизни радиоактивного ядра  $\tau$  (совпадает со временем релаксации, т. е. интервалом времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в  $e$  раз)

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

Число атомов, содержащихся в радиоактивном веществе,

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

где  $m$  – масса вещества;  $N_A$  – число Авогадро;  $\mu$  – молярная масса.

Активность радиоактивного препарата (определяющее уравнение)

$$a = \frac{dN_{\text{расп}}}{dt},$$

где  $dN_{\text{расп}}$  – число ядер, распадающихся за интервал времени  $dt$ .

Связь активности с числом радиоактивных ядер:

$$a = \lambda N.$$

Зависимость активности от времени:

$$a = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\lambda t},$$

где  $a_0$  – активность препарата в начальный момент времени.

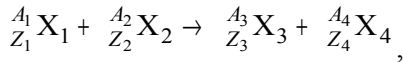
Удельная активность

$$a_{\text{уд}} = \frac{a}{m}.$$

Связь удельной активности с периодом полураспада:

$$a_{\text{уд}} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{N_A}{\mu}.$$

Символическая запись ядерной реакции может быть дана или в развернутом виде



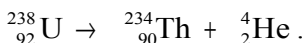
например  ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$ , или сокращенно  $A(a, b)B$ , где  $A$  и  $B$  – исходное и конечное ядра,  $a$  и  $b$  – исходная и конечная частицы в реакции, например  ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$ . При этом порядковый номер атома обычно не пишется, т. к. он определяется химическим символом атома. В скобках на первом месте ставят обозначение бомбардирующей частицы, на втором – обозначение вылетающей частицы. Для обозначения частиц приняты следующие символы:  $e$  – электрон,  $p$  – протон,  $n$  – нейтрон,  $d$  – дейтрон (ядро атома изотопа водорода  ${}^2_1\text{H}$ ),  $t$  – тритон (ядро атома изотопа водорода  ${}^3_1\text{H}$ ),  $\alpha$  – альфа-частица (ядро атома изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ ),  $\gamma$  – гамма-частица, или гамма-квант.

Во всех ядерных реакциях выполняются законы сохранения:

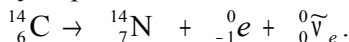
- а) числа нуклонов  $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$ ;
- б) заряда  $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$ ;
- в) релятивистской полной энергии  $E_1 + E_2 = E_3 + E_4$ ;
- г) импульса  $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$ .

Если общее число ядер и частиц, образовавшихся в результате реакции, больше двух, то запись и уравнения дополняются соответствующими слагаемыми, отвечающими третьей частице, и т. д.

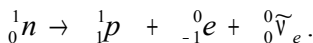
Реакция  $\alpha$ -распада урана



Реакция  $\beta$ -распада углерода



Реакция  $\beta$ -распада нейтрона



Энергия ядерной реакции (энергетический выход) определяется как разница кинетических энергий:

$$Q = \sum_j E_{k,j} - \sum_i E_{k,i},$$

где  $\sum_j E_{k,j}$ ,  $\sum_i E_{k,i}$  – суммы кинетических энергий соответственно частиц-продуктов и исходных частиц.

Энергия ядерной реакции также может быть вычислена с помощью энергий покоя или масс покоя соответствующих частиц:

$$Q = c^2 \left( \sum_i m_i - \sum_j m_j \right).$$

где  $\sum_i m_i$ ,  $\sum_j m_j$  – суммы масс покоя соответственно исходных частиц и частиц-продуктов.

Во внесистемных единицах (масса в а. е. м.)

$$Q = \left( \sum_i m_i - \sum_j m_j \right) k.$$

где  $Q$  выражена в МэВ,  $k = 931,5$  МэВ/а. е. м.

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1.** Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого отрезком провода длиной  $l = 60$  см в точке  $A$ , равноудаленной от его концов и находящейся на расстоянии  $r_0 = 30$  см от его середины. По проводу течет ток силой  $I = 10$  А.

Д а н о:

$$l = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м}$$

$$I = 10 \text{ А}$$

$$r_0 = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$$

$B = ?$

*Решение.* Магнитное поле в точке пространства создается отрезком проводника с током (см. рисунок). Согласно закону Био–Савара–Лапласа модуль вектора  $\vec{B}$  от элемента  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  в точке, положение

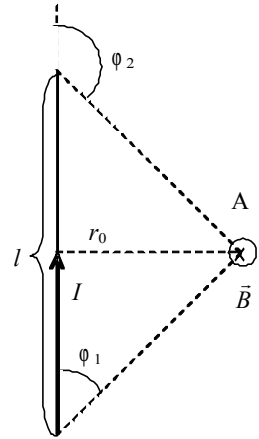
которой определяется радиус-вектором  $\vec{r}$ , вычисляется по формуле

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

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

Интегрирование этой формулы (в соответствии с принципом суперпозиции) по всем элементам  $d\vec{l}$  отрезка проводника приводит к следующему соотношению для модуля вектора индукции магнитного поля, создаваемого всем проводником:

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



где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между векторами, соединяющими концы отрезка провода с точкой  $A$ , и направлением провода. Следует отметить, что формула дает правильный результат только в том случае, если углы откладываются от направлений из рассматриваемой точки к концам отрезка и отрезком (или его продолжением) с учетом направления тока, а также если порядок углов соответствует направлению тока.

В рассматриваемом случае  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $\varphi_2 = 135^\circ$ , соответственно  $\cos \varphi_1 = 0,707$ , а  $\cos \varphi_2 = -0,707$ .

Подставим в формулу численные значения и, с учетом  $\mu = 1$  для вакуума, произведем расчет:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10}{4\pi \cdot 0,3} (0,707 + 0,707) = 4,71 \cdot 10^{-6} \text{ Тл.}$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[B] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \text{Тл.}$$

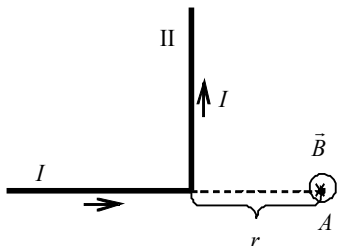
Ответ:  $B = 4,71 \cdot 10^{-6}$  Тл.

**Пример 2.** Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток  $I = 1$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $A$ , если  $r = 0,1$  м?



Д а н о:  
 $I = 1 \text{ А}$   
 $r = 0,1 \text{ м}$   
 $B = ?$

*Решение.* Магнитное поле в точке  $A$  создается проводником с током, изогнутым под прямым углом. Закон Био–Савара–Лапласа позволяет рассчитать магнитную индукцию от проводника с током простой (формы) геометрии.



В нашем случае поле от всего проводника следует рассматривать как суперпозицию полей, созданных двумя отрезками I и II, бесконечных с одной стороны и ограниченных с другой стороны изломом:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Согласно закону Био–Савара–Лапласа модуль вектора  $\vec{B}$  от элемента  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  вычисляется по формуле

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

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

Для отрезка проводника в результате интегрирования этой формулы получим

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между векторами, соединяющими концы отрезка провода с точкой  $A$ , и направлением провода.

В точке  $A$  магнитная индукция поля, создаваемого отрезком  $I$ ,  $B_1 = 0$ , т.к. для каждого элемента  $dl$  этого отрезка по формуле (1)  $dB = 0$ .

Магнитную индукцию поля  $B_2$  в точке  $A$ , создаваемого отрезком II, определяем по формуле (2). В этом случае  $\varphi_1 = 90^\circ$  и  $\varphi_2 = 180^\circ$ , соответственно  $\cos \varphi_1 = 0$ , а  $\cos \varphi_2 = -1$ .

Таким образом,

$$B = B_2 = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r}.$$

Подставим в формулу численные значения и, с учетом  $\mu = 1$  для вакуума, произведем расчет:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1}{4\pi \cdot 0,1} = 10^{-6} \text{ Тл.}$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[B] = \frac{\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}}}{\frac{\text{Вб}}{\text{А}} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \text{Тл.}$$

Ответ:  $B = 10^{-6}$  Тл.

**Пример 3.** На проволочный виток радиусом  $r = 10$  см, помещенный между полюсами магнита, действует максимальный механический момент  $M_{\max} = 6,5$  мкН·м. Сила тока в витке  $I = 2$  А. Пренебрегая действием магнитного поля Земли, определить магнитную индукцию поля между полюсами магнита.

Д а н о:  
 $r = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$   
 $M_{\max} = 6,5 \text{ мкН} \cdot \text{м} =$   
 $= 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$   
 $I = 2 \text{ А}$   
 $B = ?$

*Решение.* Индукцию магнитного поля можно определить из выражения механического момента, действующего на виток с током,

$$M = p_{\max} B \sin \alpha.$$

Если учесть, что максимальное значение механический момент принимает при  $\alpha = \pi/2$  ( $\sin \alpha = 1$ ), а также что  $p_{\max} = IS$ , то формула примет вид

$$M_{\max} = IBS.$$

Отсюда, учитывая, что площадь витка  $S = \pi r^2$ , находим

$$B = \frac{M_{\max}}{\pi r^2 I}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$B = \frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 2} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[B] = \frac{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{А}}}{\frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{А}}} = \text{Тл.}$$

Ответ:  $B = 104$  мкТл.

**Пример 4.** Чему равна механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной 20 см со скоростью 5 м/с перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 0,1 Тл? Величина тока в проводнике 50 А.

Д а н о:  
 $l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$   
 $v = 5 \text{ м/с}$   
 $B = 0,1 \text{ Тл}$   
 $I = 50 \text{ А}$   
 $A = ?$

*Решение.* Со стороны магнитного поля на проводник с током действует сила Ампера, величина которой определяется формулой

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

где  $dl$  – длина элемента проводника;  $B$  – индукция магнитного поля в данной точке. Поскольку в данном случае магнитное поле однородно ( $B = \text{const}$ ), а угол между проводником  $l$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  равен  $\pi/2$ , то модуль силы Ампера, действующей на весь проводник длиной  $l$ , можно определить по формуле

$$F = IBl.$$

Работа, которую совершает сила Ампера по перемещению проводника с током в магнитном поле на расстояние  $ds$  вдоль направления действия силы

$$dA = Fds.$$

Тогда механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника, будет определяться формулой

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{Fds}{dt} = Fv = IBlv.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$P = 50 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 5 = 5 \text{ Вт}.$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[P] = \text{А} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \text{А} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Ответ:  $P = 5 \text{ Вт}$ .

**Пример 5.** Электрон, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 900 \text{ В}$ ,

влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1$  мТл под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям индукции. Определить радиус  $R$  и шаг  $h$  винтовой линии движения электрона.

Д а н о:  
 $U = 900$  В  
 $B = 1$  мТл =  $1 \cdot 10^3$  Тл  
 $\alpha = 60^\circ$   


---

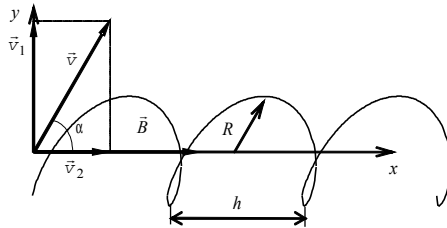
 $R = ?$   $h = ?$

*Решение.* На заряженную частицу, влетевшую в магнитное поле, действует сила Лоренца, перпендикулярная векторам магнитной индукции и скорости частицы. Модуль этой силы для электрона

$$F = evB \sin \alpha ,$$

где  $e$  – элементарный заряд;  $v$  – скорость электрона.

Движение электрона удобно представить как наложение двух движений: 1) со скоростью  $v_1 = v \sin \alpha$  перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ ; 2) со скоростью  $v_2 = v \cos \alpha$  параллельно этому вектору (см. рисунок). В результате одновременного участия в двух движениях по окружности и по прямой электрон будет двигаться по винтовой линии с осью, параллельной силовым линиям поля.



Для первого движения под действием силы Лоренца модуль скорости не изменяется, останется постоянным и значение силы Лоренца. Постоянная сила, перпендикулярная скорости, вызывает движение по окружности. Электрон будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, со скоростью, равной  $v_1$ .

Для определения радиуса окружности, по которой движется электрон, учтем, что центростремительное ускорение частице сообщает сила Лоренца. На основании второго закона Ньютона

$$F = ev_1 B = \frac{mv_1^2}{R} .$$

Из этой формулы найдем радиус винтовой линии:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Входящую в это выражение скорость выразим через конечную (после ускорения в электрическом поле) кинетическую энергию электрона  $W_k$ , которая по одноименной теореме равна работе ускоряющего электрического поля:

$$v = \sqrt{\frac{2W_k}{m}} = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Тогда окончательное выражение для радиуса винтовой линии приобретает вид

$$R = \frac{\sin \alpha}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}}.$$

Время одного оборота (период обращения по окружности) определим как отношение ее длины к скорости первого движения:

$$T = \frac{2\pi R}{v_1}.$$

Шаг винтовой линии равен пути, пройденному электроном вдоль поля (второе движение) со скоростью  $v_2$  за время одного оборота:

$$h = v_2 T = v_2 \frac{2\pi R}{v_1} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет для радиуса винтовой линии:

$$R = \frac{0,866}{10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 900}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 8,77 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Проверим единицы измерения в формуле для радиуса винтовой линии:

$$[R] = \frac{1}{T_L} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \sqrt{\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{с}}{\text{кг}} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \text{м}$$

Подставим в формулу численные значения и произведем

расчет шага винтовой линии:

$$h = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,577 = 0,318 \text{ м.}$$

Размерность шага винтовой линии очевидна.

Ответ:  $R = 8,8 \text{ см}$ ,  $h = 32 \text{ см}$ .

**Пример 6.** Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 15 \text{ А}$ ,  $I_2 = 10 \text{ А}$ , текущие в одном направлении, и ток  $I_3 = 20 \text{ А}$ , текущий в противоположном направлении.

Д а н о:  $I_1 = 15 \text{ А}$   
 $I_2 = 10 \text{ А}$   
 $I_3 = 20 \text{ А}$

*Решение.* Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции (иначе закон полного тока для вакуума) выражается формулой

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k,$$

где интеграл в левой части получил название циркуляции вектора магнитной индукции;  $d\vec{l}$  – вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура;  $B_l$  – составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной контура  $L$  произвольной формы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная; в правой части стоит алгебраическая сумма  $N$  токов, охватываемых контуром.

В этой сумме ток берется положительным, если его направление совпадает с направлением обхода контура, и отрицательным – в обратном случае. В нашей задаче  $N = 3$  (три тока).

Тогда  $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_1 + I_2 - I_3)$  Ток  $I_3$  берется со знаком минус, т.к. его направление противоположно токам  $I_1$  и  $I_2$ .

Проверим размерность полученной величины:

$$\left[ \oint_L \vec{B} d\vec{l} \right] = \text{Тл} \cdot \text{м}, [\mu_0 I] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \text{А} = \frac{\text{Вб}}{\text{А м}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Тл} \cdot \text{м}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} (15 + 10 - 20) = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}.$$

Проверим размерность полученной величины:

$$\left[ \oint_L \vec{B} d\vec{l} \right] = \text{Тл} \cdot \text{м}, [\mu_0 I] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \text{А} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Тл} \cdot \text{м}.$$

Ответ:  $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}.$

**Пример 7.** Железный сердечник находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 700 \text{ А/м}$ . Определить индукцию  $B$  магнитного поля в сердечнике и магнитную проницаемость  $\mu$  железа.

**Дано:**  $H = 700 \text{ А/м}$   
**В - ?  $\mu$  - ?**

**Решение.** Для ферромагнетиков магнитная проницаемость  $\mu$  не является постоянной величиной. Она зависит от величины напряженности магнитного поля  $H$ .

Для изотропного и однородного магнетика индукция магнитного поля  $B$  связана с его напряженностью формулой  $B = \mu_0 \mu H$ , откуда следует

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Величину индукции магнитного поля  $B$  найдем из графика на рисунке 2. Для железа при  $H = 700 \text{ А/м}$   $B = 1,3 \text{ Тл}$ .

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\mu = \frac{1,3}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 700} = 1,5 \cdot 10^3.$$

Проверим единицу измерения полученной величины:

$$[\mu] = \text{Тл} \frac{\text{м}}{\text{Гн}} \frac{\text{м}}{\text{А}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{Вб}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Тл} \cdot \text{м}^2} = 1.$$

Ответ:  $B = 1,3 \text{ Тл}$ ;  $\mu = 1,5 \cdot 10^3$ .

**Пример 8.** Плоский контур площадью  $S = 25 \text{ см}^2$  находится в магнитном поле с индукцией  $B = 0,01 \text{ Тл}$ . Определить магнитный поток, пронизывающий контур, если его плоскость составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями индукции.

**Дано:**  
 $S = 25 \text{ см}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$   
 $B = 0,01 \text{ Тл}$   
 $\alpha = 60^\circ$

**Решение.** Магнитный поток через плос-

кий контур площадью  $S$  в общем случае равен

$$\Phi_B = \int_S B_n dS.$$

Для однородного поля

$$\Phi_B = B_n S = BS \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью к поверхности контура.

Согласно условию  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha$ , поэтому  $\cos \varphi = \sin \alpha$ . Окончательно получим:

$$\Phi_B = BS \sin \alpha.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\Phi_B = 0,01 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,866 = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

Размерность магнитного потока очевидна.

Ответ:  $\Phi_B = 0,22 \text{ мкВб}$ .

**Пример 9.** Замкнутый тороид с железным сердечником имеет  $N = 400$  витков из тонкой проволоки, намотанных в один слой. Средний диаметр тороида  $d = 25$  см. Определить напряженность и индукцию магнитного поля внутри тороида, магнитную проницаемость  $\mu$  железа, а также намагниченность  $J$  при значениях силы тока в обмотке тороида  $I = 5$ .

Д а н о:

$$d = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$$

$$N = 400$$

$$I = 5 \text{ А}$$

*Решение.* Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру  $L$  (закон полного тока для магнитного поля в веществе):

---


$$H - ? \quad B - ?$$

$$\mu - ? \quad J - ?$$

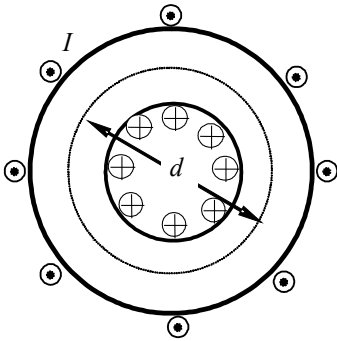
$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H_l dl = \sum_i^N I_i.$$

Выберем в качестве контура  $L$  окружность, проходящую по средней линии тороида (с диаметром, равным  $d$ ).

Применяя этот закон, получим:  $H\pi d = IN$ .



Здесь учтено, что контур совпадает с силовой линией магнитного поля (см. рисунок), величина напряженности во всех точках контура



одинакова в силу симметрии, длина контура равна  $\pi d$ , а каждый ток  $I$  пересекает поверхность контура  $N$  раз в одном и том же направлении.

Найдем отсюда напряженность магнитного поля внутри тороида:

$$H = \frac{IN}{\pi d}.$$

После расчета получим значение напряженности  $H = 2550$  А/м.

Далее, используя график на рисунке 2, определим индукции магнитного поля для железа:  $B = 1,45$  Тл.

Для однородного и изотропного магнетика магнитная проницаемость находится по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

После расчетов получим:  $\mu \approx 450$ .

Для расчета значений намагниченности используем формулу

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

Результаты расчетов:  $J \approx 1,1 \cdot 10^6$  А/м.

Ответ:  $H = 2550$  А/м,  $B = 1,45$  Тл,  $\mu \approx 450$ ,  $J \approx 1,1 \cdot 10^6$  А/м.

**Пример 10.** Материальная точка массой  $m = 10$  г совершает гармонические колебания с частотой  $\nu = 0,5$  Гц и амплитудой  $A = 3$  см. Определить скорость точки и силу, действующую на нее, в момент времени, когда смещение  $x = 1,5$  см, а также полную энергию колебаний.

Д а н о:  
 $m = 10 \text{ г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$   
 $\nu = 0,5 \text{ Гц}$   
 $A = 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$   
 $x = 1,5 \text{ см} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$   
 $\nu, F, W - ?$

*Решение.* Уравнение гармонических колебаний имеет вид

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

а формулу скорости получим, взяв производную по времени от смещения:

$$v = dx/dt = -A\omega \sin(\omega t + \varphi).$$

Чтобы выразить скорость через смещение, надо исключить из предыдущих формул время. Для этого возведем оба уравнения в квадрат, разделим первое на  $A^2$ , второе на  $A^2\omega^2$  и сложим:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{A^2\omega^2} = 1 \quad \text{или} \quad \frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{4\pi^2\nu^2 A^2} = 1.$$

Решив последнее уравнение относительно  $v$ , найдем

$$v = \pm 2\pi\nu \sqrt{A^2 - x^2},$$

где знак плюс соответствует случаю, когда направление скорости совпадает с положительным направлением оси  $x$  (положительная проекция), знак минус – когда направление скорости противоположно.

Выполнив вычисления по этой формуле, получим

$$v = \pm 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{(3 \cdot 10^{-2})^2 - (1,5 \cdot 10^{-2})^2} = \pm 8,2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Силу, действующую на точку, найдем по второму закону Ньютона:

$$F = ma,$$

где  $a$  – ускорение точки (точнее, его проекция), которое получим, взяв производную по времени от скорости:

$$a = dv/dt = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x.$$

Подставив выражение для ускорения в формулу для силы, получим

$$F = -m\omega^2 x = -4\pi^2\nu^2 mx,$$

где знак минус соответствует противоположному направлению силы и смещения (отрицательная проекция силы).

Подставив в это уравнение значения всех величин, найдем

$$F = -(2 \cdot 3,14 \cdot 0,5)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = -1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

Полная энергия гармонических колебаний точки есть сумма кинетической и потенциальной энергий, вычисленных для любого момента времени. Проще всего вычислить полную энергию в момент, когда кинетическая энергия достигает максимального значения. В этот момент потенциальная энергия равна нулю. Поэтому полная энергия  $W$

гармонических колебаний равна максимальной кинетической энергии  $W_{к, \max}$ :

$$W = W_{к, \max} = m v_{\max}^2 / 2.$$

Максимальную скорость  $v_{\max}$  определим из формулы для скорости колебаний, положив  $\sin(\omega t + \varphi) = -1$ ,  $v_{\max} = \omega A = 2\pi\nu A$ . Подставив это выражение в формулу для полной энергии, найдем

$$W = 2\pi^2 m \nu^2 A^2.$$

Подставив значения всех величин в эту формулу и произведя вычисления, получим

$$W = 2 \cdot (3,14 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 44,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

Проверим единицу измерения полученной величины:

$$[W] = \text{кг} \cdot \text{Гц}^2 \cdot \text{м}^2 = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Ответы:  $v = \pm 8,2 \text{ см/с}$ ;  $F = -1,44 \text{ мН}$ ;  $W = 44,2 \text{ мкДж}$ .

**Пример 11.** Небольшое тело массой  $m = 10 \text{ г}$  совершает синусоидальные гармонические колебания с периодом  $T = 1 \text{ с}$  и нулевой начальной фазой. Определить амплитуду колебаний, если через  $t = 0,3 \text{ с}$  после их начала кинетическая энергия тела составляла  $W_k = 1,2 \text{ мДж}$ .

Д а н о:  
 $m = 10 \text{ г}$   
 $T = 1 \text{ с}$   
 $\varphi_0 = 0$   
 $t = 0,3 \text{ с}$   
 $W_k = 1,2 \text{ мДж}$   
 $A = ?$

*Решение.* В соответствии с условием задачи уравнение происходящих гармонических колебаний имеет вид

$$x = A \sin(\omega t),$$

где  $x$  – смещение тела от положения равновесия;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ – циклическая частота колебаний.}$$

Проекция скорости тела на направление оси, вдоль которой отсчитывается его смещение, определяется с помощью производной по времени:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t).$$

Поэтому кинетическая энергия тела будет задаваться выражением

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2}(\omega A)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$

После преобразований получим конечную формулу для амплитуды

$$A = \frac{T}{2\pi \left| \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right|} \sqrt{\frac{2W_k}{m}}.$$

Здесь использован модуль, вообще говоря, знакопеременной функции, т. к. по определению амплитуда – величина положительная.

Подставив значения всех величин в эту формулу и произведя вычисления, получим

$$A = \frac{1}{2\pi \left| \cos\left(\frac{2\pi}{1} \cdot 0,3\right) \right|} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{10^{-2}}} = 0,25 \text{ м.}$$

Проверим единицу измерения полученной величины:

$$[A] = \frac{\text{с}}{1} \cdot \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \text{с} \cdot \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{с}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}} = \text{м}.$$

Ответ:  $A = 0,25 \text{ м}$ .

**Пример 12.** Два одинаково направленных гармонических колебания с одинаковыми амплитудами и периодами складываются в одно колебание, с амплитудой в два раза меньше. Определить разность фаз складываемых колебаний.

|   |  |
|---|--|
| <p>Д а н о:</p> <p><math>A_1 = A_2</math></p> <p><math>T_1 = T_2</math></p> <p><math>\frac{A_1}{A} = k = 2</math></p> <p><math>\Delta\varphi = ?</math></p> | <p><i>Решение.</i> При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинаковой частоты (т.к. периоды одинаковы) получается гармоническое колебание той же частоты с амплитудой</p> $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})},$ <p>где <math>\varphi_{01}</math> и <math>\varphi_{02}</math> – начальные фазы складываемых колебаний.</p> |
|---|--|

В силу того, что частоты колебаний одинаковы, их фазы с течением времени изменяются одинаково. Разность фаз остается постоянной и поэтому может быть определена в начальный момент времени, т. е.

$\Delta\varphi = \varphi_{02} - \varphi_{01}$ . Перепишем выражение для амплитуды результирующего колебания с учетом условий задачи:

$$\left(\frac{A_1}{k}\right)^2 = 2A^2 + 2A^2 \cos(\Delta\varphi),$$

где введено обозначение  $A_1 = A_2 = A$ .

Из полученного соотношения после сокращений и других несложных преобразований следует окончательная формула для разности фаз

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{1 - 2k^2}{2k^2}\right).$$

Очевидно, что выражение в арккосинусе безразмерное.

Произведем расчет

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{1 - 2 \cdot 2^2}{2 \cdot 2^2}\right) = 151^\circ.$$

Ответ:  $\Delta\varphi = 151^\circ$ .

**Пример 13.** Определить логарифмический декремент затухания колебаний системы, если период ее затухающих колебаний на 1 % больше периода собственных незатухающих колебаний.

|   |  |
|---|--|
| <p>Д а н о:</p> $\frac{\Delta T}{T_0} = 10^{-2}$ <p><math>\theta - ?</math></p> | <p><i>Решение.</i> Частота затухающих колебаний системы <math>\omega</math> связана с частотой ее собственных незатухающих колебаний <math>\omega_0</math> и коэффициентом затухания <math>\beta</math>:</p> $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$ |
|---|--|

Выражая логарифмический декремент затухания  $\theta$  через период затухающих колебаний  $T$  ( $\theta = \beta T$ ), а период – через частоту затухающих колебаний  $\omega$  ( $T = 2\pi/\omega$ ), найдем соотношение между частотами:

$$\omega = \frac{2\pi\omega_0}{\sqrt{4\pi^2 + \theta^2}}.$$

Произведя в последнем уравнении обратный переход от частот к периодам, получим

$$T = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2},$$

где  $T_0$  – период собственных незатухающих колебаний системы.

Из последнего соотношения найдем выражение для логарифмического декремента затухания:

$$\theta = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0} \left(2 + \frac{\Delta T}{T_0}\right)};$$

подставив в него исходные данные, получим ответ задачи:

$$\theta = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{10^{-2}(2 + 10^{-2})} = 0,628.$$

Очевидно, что конечная формула дает безразмерную величину.

Ответ:  $\theta = 0,628$ .

**Пример 14.** Колебательный контур имеет емкость  $C = 1,1$  нФ и индуктивность  $L = 5$  мГн. Логарифмический декремент затухания  $\theta = 0,005$ . За какое время вследствие затухания потеряется 99 % энергии контура?

|   |
|---|
| <p>Д а н о:</p> <p><math>C = 1,1</math> нФ</p> <p><math>L = 5</math> мГн</p> <p><math>\theta = 0,005</math></p> <p><math>\frac{\Delta E}{E_0} = k = 0,99</math></p> <p><math>t - ?</math></p> |
|---|

*Решение.* Так как логарифмический декремент затухания  $\theta \ll 1$ , то колебания являются слабозатухающими, и их параметры незначительно отличаются от соответствующих параметров незатухающих колебаний. Докажем это. Для этого найдем период затухающих колебаний  $T$ . Для экспоненциального затухания

$$\theta = \beta T \Rightarrow \beta = \frac{\theta}{T},$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания.

В свою очередь период обратно пропорционален циклической частоте  $\omega$ :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\theta}{T}\right)^2}},$$

где  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  – циклическая частота незатухающих колебаний,  $T_0$  – соответствующий период.

После несложных преобразований получим

$$T = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2}.$$

Таким образом, для периодов высказанное утверждение доказано.

По условию отношение оставшейся в контуре энергии  $E$  к начальной энергии  $E_0$  через время  $t$  составит

$$\frac{E}{E_0} = 1 - k.$$

Запасенная в системе энергия пропорциональна квадрату амплитуды колебаний, не слишком сильно отличающихся от гармонических. В соответствии с этим

$$\frac{A}{A_0} = \sqrt{1 - k},$$

где  $A$  – амплитуда в момент времени  $t$ ;  $A_0$  – амплитуда в начальный момент времени.

Для экспоненциального затухания

$$A = A_0 \exp(-\beta t) \Rightarrow A = A_0 \exp\left(-\frac{\theta}{T} t\right) \approx A_0 \exp\left(-\frac{\theta}{T_0} t\right).$$

Отсюда

$$t \approx -\frac{T_0}{\theta} \ln(\sqrt{1 - k}).$$

Для колебательного контура  $T_0 = 2\pi \sqrt{LC}$ .

Окончательно получим

$$t \approx -\frac{2\pi \sqrt{LC}}{\theta} \ln(\sqrt{1 - k}).$$

Произведем вычисления:

$$t = -\frac{2\pi \sqrt{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^{-9}}}{5 \cdot 10^{-3}} \ln(\sqrt{1 - 0,99}) = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

В соответствии с формулой Томсона в проверке единиц нет необходимости.

Ответ:  $t = 6,8$  мс.

**Пример 15.** Установка для получения колец Ньютона освещается светом от ртутной дуги, падающим нормально. Наблюдение производится в проходящем свете. Какое по порядку светлое кольцо, соответствующее линии  $\lambda_1 = 579,1$  нм, совпадает со следующим светлым кольцом, соответствующим линии  $\lambda_2 = 577$  нм?

Д а н о:  
 $\lambda_1 = 579,1$  нм  
 $\lambda_2 = 577$  нм  
 $k_2 = k_1 + 1$   
 $k_1 - ?$

*Решение.* Радиус светлого кольца Ньютона, наблюдаемого в проходящем свете, определяется по формуле

$$r = \sqrt{kR\lambda} ,$$

где  $k$  – номер кольца;  $R$  – радиус кривизны линзы;  $\lambda$  – длина волны света в промежутке между линзой и плоской стеклянной пластинкой.

В соответствии с условием задачи (кольца совпадают, значит, равны их радиусы)

$$\sqrt{k_1 R \lambda_1} = \sqrt{k_2 R \lambda_2} .$$

Подставим условие для номеров колец:

$$\sqrt{k_1 R \lambda_1} = \sqrt{(k_1 + 1) R \lambda_2} .$$

После преобразований из этого соотношения получим

$$k_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} .$$

После подстановки исходных данных найдем

$$k_1 = \frac{577}{579,1 - 577} = 275 .$$

Размерность конечной формулы очевидна.

Ответ:  $k_1 = 275$ .

**Пример 16.** При нормальном падении света на дифракционную решетку шириной  $l = 10$  мм обнаружено, что компоненты желтой линии натрия с длиной волны  $\lambda = 590$  нм, отличающиеся на  $\Delta\lambda = 0,6$  нм, оказываются разрешенными, начиная с пятого порядка спектра. Определить период этой решетки.

Д а н о:  
 $l = 10$  мм  
 $\lambda = 590$  нм  
 $\Delta\lambda = 0,6$  нм  
 $k = 5$   
 $D - ?$

*Решение.* Разрешающая способность спектрального прибора определяется по уравнению



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

Для дифракционной решетки

$$R = kN,$$

где  $N$  – общее число щелей в решетке, которое в соответствии с ее периодом равно

$$N = \frac{l}{d}.$$

Из вышеприведенных соотношений, исключая  $R$  и  $N$ , получим

$$d = \frac{k l \Delta\lambda}{\lambda}.$$

Произведем вычисления:

$$d = \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-10}}{5,9 \cdot 10^{-7}} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Очевидно, что конечная формула дает размерность длины.

Ответ:  $d = 5,1 \cdot 10^{-5}$  м.

**Пример 17.** Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от нее пучок света образует угол  $\varphi = 97^\circ$  с падающим пучком. Определить показатель преломления жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.

Д а н о:  
 $\varphi = 97^\circ$   
 $n_1 = ?$

*Решение.* Согласно закону Брюстера луч, отраженный от границы раздела двух диэлектриков, полностью (максимально) поляризован, если угол падения удовлетворяет условию

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{21},$$

где  $\alpha_{\text{Бр}}$  – угол падения (угол Брюстера);  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  – относительный показатель преломления второго вещества (стекло) относительно первого (жидкость).

Так как угол падения равен углу отражения (закон отражения), то  $\varphi = 2\alpha_{\text{Бр}}$ . Отсюда получим

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 = n_2 \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}.$$

Произведем вычисления:

$$n_1 = 1,5 \cdot \operatorname{ctg} 45^\circ = 1,33.$$

Очевидно, что конечная формула дает безразмерную величину.

Ответ:  $n_1 = 1,33$ .

**Пример 18.** Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, равна  $\lambda_m = 0,87$  мкм. Определить максимальную спектральную плотность излучательности для этих условий.

Д а н о:

$$\frac{\lambda_m = 0,87 \text{ мкм} = 8,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{(r_\lambda)_{\max} - ?}$$

*Решение.* Максимальная спектральная плотность излучательности абсолютно черного тела пропорциональна пятой степени его температуры и выражается формулой (иногда называемой вторым законом Вина)

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

где  $C = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$  – вторая постоянная Вина.

Температуру  $T$  выразим из закона смещения Вина

$$\lambda_m T = b, \text{ откуда } T = b/\lambda_m.$$

Подставив полученное выражение температуры в первую формулу, найдем

$$(r_\lambda)_{\max} = C \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^5.$$

Произведем вычисления:

$$(r_\lambda)_{\max} \approx 1,29 \cdot 10^{-5} \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-7}} \right)^5 \approx 5,3 \cdot 10^{12} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right).$$

Проверим единицу измерения полученной величины:

$$[(r_\lambda)_{\max}] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5} \left( \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{м}} \right)^5 = \frac{\text{Вт} \cdot \text{К}^5}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

Ответ:  $(r_{\lambda})_{\max} = 5,3 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{М}^3}$ .

**Пример 19.** Определить красную границу  $\lambda_0$  фотоэффекта для цезия, если при облучении его поверхности фиолетовым светом длиной волны  $\lambda = 450$  нм максимальная скорость фотоэлектронов равна  $v_{\max} = 0,61$  Мм/с.

Д а н о:

$$\lambda = 450 \text{ нм} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$v_{\max} = 0,61 \text{ Мм/с} = 6,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}$$

$$\lambda_0 - ?$$

*Решение.* При облучении светом, длина волны  $\lambda_0$  которого соответствует красной границе фотоэффекта, кинетическая энергия, а следовательно, и скорость фотоэлектронов равны нулю. Поэтому уравнение Эйнштейна для фотоэффекта в случае красной границы запишется в виде

$$h\nu_0 = A \quad \text{или} \quad hc/\lambda_0 = A.$$

Отсюда  $\lambda_0 = hc/A$ .

Работу выхода для цезия определим с помощью уравнения Эйнштейна:

$$A = h\nu - \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Подставив это соотношение в предыдущее уравнение, окончательно получим

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{1 - \frac{m\lambda v_{\max}^2}{2hc}}.$$

Произведем вычисления:

$$\lambda_0 = \frac{4,5 \cdot 10^{-7}}{1 - \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} (6,1 \cdot 10^5)^2}{2 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}} \approx 7,3 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

Проверим единицу измерения полученной величины:

$$[\lambda_0] = \text{м} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Дж} \cdot \text{с}} \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 \frac{\text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{Дж} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} \frac{\text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \text{м}.$$

Ответ:  $\lambda_0 = 730$  нм.

**Пример 20.** Пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 663$  нм падает нормально на зеркальную плоскую поверхность. Поток энергии  $\Phi_3 = 0,9$  Вт. Определить силу  $F$  давления, испытываемую этой поверхностью, а также число  $N$  фотонов, падающих на нее за время  $t = 7$  с.

Д а н о:  
 $\lambda = 663$  нм =  $6,63 \cdot 10^{-7}$  м  
 $\rho = 1$   
 $\Phi_3 = 0,9$  Вт  
 $\Delta t = 7$  с  
 $F, N - ?$

*Решение.* Сила светового давления на поверхность равна произведению светового давления  $p$  на площадь  $S$ :

$$F = pS.$$

В свою очередь, световое давление может быть найдено по формуле

$$p = \frac{E_3}{c}(1 + \rho),$$

где  $E_3$  – энергетическая освещенность поверхности (из определения  $E_3 = \Phi_3/S$ );  $\rho$  – коэффициент отражения света ( $\rho = 1$ , т. к. поверхность зеркальная).

С учетом этих соотношений получим для силы давления, испытываемой этой поверхностью,

$$F = \frac{\Phi_3}{c}(\rho + 1).$$

Число фотонов, падающих на поверхность, можно определить с помощью энергии излучения  $\Delta W$ , получаемой поверхностью:

$$N = \frac{\Delta W}{\varepsilon} = \frac{\Phi_3 \Delta t}{\varepsilon},$$

где  $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$  – энергия одного фотона.

Окончательно получим

$$N = \frac{\Phi, \lambda \Delta t}{hc}.$$

Произведем вычисления:

$$F = \frac{0,9}{3 \cdot 10^8} (1 + 1) \approx 6 \cdot 10^{-9} \text{ (Н)}.$$

$$N = \frac{0,9 \cdot 6,63 \cdot 10^{-7} \cdot 7}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 2,1 \cdot 10^{19}.$$

Проверим единицу измерения полученной величины:

$$[N] = \text{Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \frac{1}{\text{Дж} \cdot \text{с}} \frac{\text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}} = 1.$$

Ответ:  $F = 6 \text{ нН}$ ,  $N = 2,1 \cdot 10^{19}$ .

**Пример 21.** Определить согласно теории Бора момент импульса электрона в однократно ионизированном атоме гелия ( $\text{He}^+$ ), если его полная энергия  $E = -3,4 \text{ эВ}$ .

Д а н о:  
 $E = -3,4 \text{ эВ}$   
 $Z = 2$   
 $E_i = 13,6 \text{ эВ}$   
 $L - ?$

*Решение.* Полная энергия электрона, находящегося на  $n$ -й орбите в водородоподобном атоме,

$$E_n = - \frac{Z^2 E_i}{n^2},$$

где  $E_i$  – энергия ионизации атома водорода;  $Z$  – зарядовое число (для гелия  $Z = 2$ ).

Момент импульса электрона на стационарной орбите

$$L = mvr = n\hbar,$$

где  $m$  – масса электрона;  $v$  – его скорость;  $r$  – радиус орбиты;  $\hbar$  – постоянная Планка.

Выразив номер орбиты из первого уравнения и подставив его во второе, найдем искомое соотношение для момента импульса:

$$L = Z\hbar \sqrt{-\frac{E_i}{E_n}} = Z\hbar \sqrt{-\frac{E_i}{E}}.$$

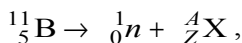
Вычисления выполним во внесистемных единицах ( $E_i = 13,6$  эВ):

$$L = 2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \sqrt{-\frac{13,6}{-3,4}} \approx 4,2 \cdot 10^{-34} \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} \right).$$

Ответ:  $L = 4,2 \cdot 10^{-34} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$ .

**Пример 22.** Определить разность энергий связи нейтрона и протона в ядре  ${}^1_5\text{B}$ .

*Решение.* Энергию связи нейтрона определим как минимальную работу, которую необходимо совершить для разделения исходного ядра на нейтрон и дочернее ядро. Символическая запись реакции распада будет иметь вид



где  $Z$  и  $A$  – соответственно зарядовое и массовое числа дочернего ядра.

Применив закон сохранения числа нуклонов, получим уравнение

$$11 - 1 = A, \text{ отсюда } A=10.$$

Применив закон сохранения электрического заряда (числа протонов), получим уравнение

$$5 = 0 + Z, \text{ отсюда } Z=5.$$

Следовательно, неизвестное ядро является ядром атома изотопа бора  ${}^{10}_5\text{B}$ .

По аналогии с выражением для расчета энергии связи ядра энергию связи одного нейтрона можно рассчитать по формуле

$$E_n = c^2(m_n + m_{\text{я}} - m),$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $m_n$  – масса нейтрона;  $m_{\text{я}}$  – масса дочернего ядра;  $m$  – масса исходного ядра.

При практических расчетах массы ядер удобно заменить массами соответствующих атомов.

Аналогичные рассуждения можно провести и для энергии связи одного протона в ядре. В данном случае дочерним ядром будет ядро

изотопа  ${}^{10}_4\text{Be}$ , а энергию связи найдем по такой же формуле. Отсюда для разности энергий связи получим

$$\Delta E = E_n - E_p = c^2[(m_n + m_B) - (m_p + m_{\text{Be}})],$$

где  $m_B$  – масса атома  ${}^{10}_5\text{B}$ ;  $m_{\text{Be}}$  – масса атома  ${}^{10}_4\text{Be}$ .

При использовании внесистемных единиц (МэВ – для энергии и а. е. м. – для масс) расчетная формула примет вид

$$\Delta E = 931,5[(m_n + m_B) - (m_p + m_{\text{Be}})].$$

Подставив массы атомов в расчетную формулу, получим  
 $\Delta E = 931,5 \cdot [(1,00867 + 10,01294) - (1,00783 + 10,01354)] = 0,22$   
 МэВ.

Ответ:  $\Delta E = 0,22$  МэВ.

**Пример 23.** Определить начальную активность радиоактивного препарата магния  ${}^{27}_{12}\text{Mg}$  массой  $m = 0,2$  мкг, а также его активность через  $t = 6$  часов. Период полураспада магния считать известным.

Д а н о:  
 $m = 0,2$  мкг  
 $T = 10$  мин  
 $t = 6$  ч  
 $a_0, a - ?$

*Решение.* Активность радиоактивного изотопа пропорциональна числу ядер  $N$  (в данный момент времени):

$$a = \lambda N,$$

где  $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$  – постоянная распада.

Число ядер найдем с помощью закона радиоактивного распада:

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

где  $N_0$  – начальное число ядер.

Начальная активность таким же образом связана с начальным числом ядер:

$$a_0 = \lambda N_0.$$

Число ядер, содержащееся в препарате, равно произведению постоянной Авогадро  $N_A$  на количества вещества  $\nu$ :

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где  $\mu = 2,7 \cdot 10^{-2}$  кг/моль – молярная масса изотопа.

Подстановка вышеприведенных выражений в соотношения для активностей дает

$$a_0 = \frac{\ln 2}{T} \frac{m}{\mu} N_A; \quad a = a_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T} t\right).$$

Проведем расчеты:

$$a_0 = \frac{0,693}{600} \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{2,7 \cdot 10^{-2}} 6,02 \cdot 10^{23} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ (Бк)};$$

$$a = 5,13 \cdot 10^{12} \cdot \exp\left(-\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4\right) = 81,3 \text{ (Бк)}.$$

Проверим размерности в первой формуле:

$$[a_0] = \frac{1}{\text{с}} \cdot \frac{\text{кг} \cdot \text{МОЛЬ}}{\text{кг}} \cdot \frac{1}{\text{МОЛЬ}} = \frac{1}{\text{с}} = \text{Бк}.$$

Ответы:  $a_0 = 5,13 \cdot 10^{12}$  Бк;  $a = 81,3$  Бк.

## ЗАДАЧИ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 2

2.1 По двум параллельным бесконечно длинным проводникам, находящимся на расстоянии  $d = 5$  см друг от друга, текут токи противоположного направления силой  $I = 20$  А. Определить индукцию магнитного поля в точке, расположенной посередине между проводниками.

2.2 Найти величину тока в проводнике, который изогнут в виде квадрата со стороной 20 см, если индукция магнитного поля в точке, расположенной в центре квадрата, равна 55 мкТл.

2.3 Определить индукцию магнитного поля в центре квадрата со стороной 20 см, по которому течет ток 40 А.

2.4 Определить индукцию магнитного поля в центре проволочной квадратной рамки со стороной  $a = 10$  см, если по рамке течет ток силой  $I = 3$  А.

2.5 Ток 20 А течет по бесконечно длинному проводнику, согнутому под углом  $90^\circ$ . Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе угла на расстоянии 0,1 м от вершины.

2.6 Определить индукцию магнитного поля в точке, находящейся на продолжении одной из сторон прямого угла, образованного беско-



нечно длинным проводником, по которому течет ток 15 А, на расстоянии 10 см от вершины угла.

2.7 Два бесконечно длинных прямых провода скрещены под прямым углом. По проводам текут токи  $I_1 = 50$  А и  $I_2 = 30$  А. Расстояние  $d$  между проводами равно 10 см. Определить магнитную индукцию  $B$  в точке  $A$ , одинаково удаленной от обоих проводников (рисунок 1).

2.8 По двум бесконечно длинным прямым проводам, скрещенным под прямым углом (см. рисунок 1) текут токи  $I_1 = 20$  А и  $I_2 = 30$  А. Расстояние  $d$  между проводами равно 10 см. Определить магнитную индукцию  $B$  в точке  $C$ , одинаково удаленной от обоих проводников на расстояние, равное  $d$ .

2.9 Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом (рисунок 2). По проводу течет ток  $I = 50$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $A$ , если  $r = 6$  см?

2.10 Бесконечно длинный прямой провод имеет изгиб (рисунок 3). По проводу течет ток  $I = 20$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $O$ , если радиус кривизны  $r = 8$  см?

2.11 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 30$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R = 7$  см. Определить в точке  $O$  магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в случае, изображенном на рисунке 4, а.

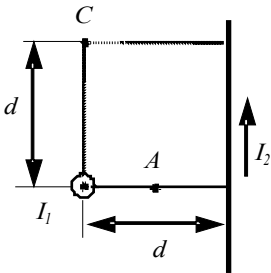


Рисунок 1

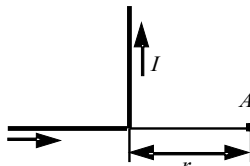


Рисунок 2

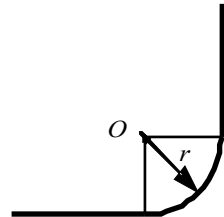


Рисунок 3

2.12 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 40$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R = 6$  см. Определить в точке  $O$  магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в случае, изображенном на рисунке 4, б.

2.13 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 20$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R = 5$  см. Определить в точке  $O$

магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током, в случае, изображенном на рисунке 4, *в*.

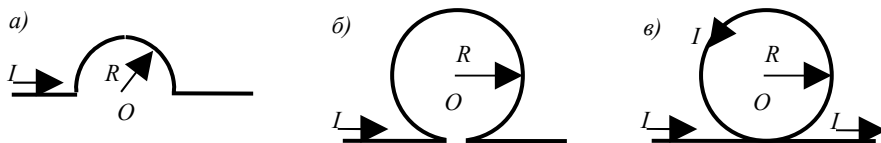


Рисунок 4

2.14 По двум прямым бесконечно длинным проводникам проходят токи в одном направлении  $I_1 = 40$  А и  $I_2 = 60$  А. Расстояние между ними равно  $a = 10$  см. Определить положение точек, в которых магнитная индукция поля равна нулю.

2.15 По двум прямым бесконечно длинным проводникам проходят токи в противоположном направлении  $I_1 = 20$  А и  $I_2 = 30$  А. Расстояние между ними равно  $a = 10$  см. Определить положение точек, в которых магнитная индукция поля равна нулю.

2.16 Найти силу тока  $I$ , проходящего по тонкому кольцу радиусом  $R = 8$  см, если магнитная индукция в центре кольца  $B = 6,5 \cdot 10^{-9}$  Тл.

2.17 По двум параллельным проводам длиной  $l = 3$  м каждый текут одинаковые токи силой  $I = 40$  А. Расстояние между проводами  $d = 10$  см. Определить силу  $F$  взаимодействия проводников.

2.18 В однородном магнитном поле с индукцией  $0,2$  Тл находится прямой медный проводник сечением  $3$  мм<sup>2</sup>, концы которого подключены гибким проводом, находящимся вне поля, к источнику постоянного тока. Определить силу тока в проводнике, если известно, что при расположении его перпендикулярно к линиям индукции поля сила тяжести проводника уравновешивается силой, действующей на проводник со стороны поля.

2.19 Чему равна механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной  $20$  см со скоростью  $5$  м/с перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $0,3$  Тл? Величина тока в проводнике  $50$  А.

2.20 Величина тока в проводнике  $5$  А. Чему равна механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной  $100$  см со скоростью  $2$  м/с перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $0,15$  Тл?

2.21 По двум параллельным проводам длиной  $l = 2$  м каждый текут одинаковые токи. Расстояние между проводами  $d = 2$  см. Токи взаимодействуют с силой  $F = 1$  мН. Найти силу тока  $I$  в проводах.

2.22 Какой вращающий момент испытывает рамка с током  $20$  А при помещении ее в однородное магнитное поле с индукцией  $0,3$  Тл, если рамка содержит  $50$  витков площадью  $10$  см<sup>2</sup>, а ее нормаль образует угол  $30^\circ$  с направлением поля?

2.23 В поле бесконечно длинного прямолинейного проводника, по которому течет ток  $I_1 = 20$  А, находится квадратная рамка со стороной  $a = 10$  см, по которой течет ток  $I_2 = 1$  А. Проводник и рамка расположены в одной плоскости так, что две стороны рамки параллельны проводнику, расстояние от проводника до ближайшей стороны рамки  $d = 5$  см. Определить силу, действующую на рамку.

2.24 Замкнутый круговой контур радиусом  $R = 2$  см, по которому течет ток  $I = 0,15$  А, помещен в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,5$  Тл так, что нормаль к контуру образует с направлением поля угол  $\alpha = 30^\circ$ . Найти момент сил, действующий на контур.

2.25 Замкнутый круговой контур радиусом  $R = 5$  см, по которому течет ток  $I = 1$  А, помещен в однородное магнитное поле так, что нормаль к контуру образует с направлением поля угол  $\alpha = 60^\circ$ . При этом на контур действует механический момент  $M = 4,5 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Найти индукцию магнитного поля.

2.26 По круговому контуру радиусом  $R = 2$  см течет ток. Контур помещен в магнитное поле индукцией  $B = 1,1$  Тл, при этом нормаль к нему образует с направлением поля угол  $\alpha = 45^\circ$ , а на контур действует момент сил  $M = 7 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Найти силу тока в контуре.

2.27 Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле, индукция которого равна  $B = 0,03$  Тл. По прямому проводу, расположенному в поле под углом  $\alpha = 30^\circ$  к силовым линиям, за время  $t$  проходит заряд, величина которого определяется законом  $q(t) = (0,5t + 2)$ , Кл. Какова длина проводника, если на него действует сила  $F = 0,15$  мН?

2.28 В однородном магнитном поле под углом  $\alpha = 30^\circ$  к силовым линиям расположен прямой провод длиной  $6,25$  см. За время  $t$  по нему проходит заряд, величина которого определяется законом  $q(t) = (0,8t + 2,75)$ , Кл. Сила, действующая при этом на провод,  $F = 2,5$  мН. Найти индукцию поля.

2.29 Из проволоки изготовлен контур в виде квадрата. На контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  мТл, действует вращающий момент сил  $M = 4,33 \cdot 10^{-6}$  Н·м. При этом по

контур проходит ток  $I = 0,2$  А, а нормаль к его плоскости составляет  $\alpha = 60^\circ$  с направлением магнитного поля. Определить длину проволоки.

2.30 Из проволоки длиной 16 см изготовлен контур в виде квадрата. При помещении контура в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 8$  мТл на него действует вращающий момент сил  $M = 1,6 \cdot 10^{-6}$  Н·м. При этом нормаль к его плоскости составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с направлением магнитного поля. Определить силу тока в контуре.

2.31 Два прямолинейных длинных проводника находятся на расстоянии  $r_1 = 8$  см друг от друга. По проводникам текут в одном направлении токи  $I_1 = 0,8$  А и  $I_2 = 0,6$  А. Чтобы раздвинуть проводники до расстояния  $r_2$ , на единицу длины проводника была совершена работа  $A = 3,33 \cdot 10^{-8}$  Дж. До какого расстояния были раздвинуты проводники?

2.32 Чтобы раздвинуть два прямолинейных длинных проводника от расстояния  $r_1$  до расстояния  $r_2 = 3r_1$ , на единицу длины проводника была совершена работа  $A = 8,8 \cdot 10^{-8}$  Дж. При этом по проводникам в одном направлении текут токи. Сила тока в первом проводнике  $I_1 = 0,2$  А. Какова сила тока  $I_2$  во втором проводнике?

2.33 Два прямолинейных длинных проводника находятся на расстоянии  $r_1$  друг от друга. По проводникам текут в одном направлении токи  $I_1 = 0,5$  А и  $I_2 = 0,4$  А. Какую работу на единицу длины проводника необходимо совершить, чтобы раздвинуть их на расстояние  $r_2 = 5r_1$ ?

2.34 В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,2$  Тл помещена квадратная рамка площадью  $S = 10$  см<sup>2</sup>. Нормаль к плоскости рамки составляет с направлением магнитного поля угол  $\alpha = 45^\circ$ . Определить вращающий момент, действующий на рамку, если по ней течет ток  $I = 1$  А.

2.35 В однородном магнитном поле с индукцией 0,3 Тл находится прямоугольная рамка длиной 10 см и шириной 5 см, содержащая 100 витков проволоки. Ток в рамке 1 А, а плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции. Определить: 1) магнитный момент рамки; 2) вращающий момент, действующий на рамку.

2.36 В однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл находится прямой проводник длиной 20 см, по которому течет ток 2 А. На проводник действует сила 0,12 Н. Определить угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

2.37 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. Какова должна быть площадь поперечного сечения алюминиевого провода, чтобы он удерживался незакрепленным?

2.38 Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на расстоянии  $R$  друг от друга. По проводникам текут в одном направлении токи одинаковой силы. Чтобы раздвинуть проводники до расстояния  $2R$ , на каждый сантиметр длины проводника была совершена работа  $A = 138$  нДж. Определить силу тока в проводниках.

2.39 По витку радиусом  $r = 5$  см течет ток  $I = 10$  А. Определить магнитный момент  $p_m$  кругового тока.

2.40 Очень короткая катушка содержит  $N = 100$  витков тонкого провода. Катушка имеет квадратное сечение со стороной длиной  $a = 10$  см. Найти магнитный момент  $p_m$  катушки при силе тока в ней  $I = 2$  А.

2.41 Магнитный момент  $p_m$  витка равен  $0,3$  А·м<sup>2</sup>. Определить силу тока в витке, если его диаметр  $d = 10$  см.

2.42 Напряженность магнитного поля в центре кругового витка  $H = 400$  А/м. Магнитный момент витка  $p_m = 1$  А·м<sup>2</sup>. Вычислить силу тока  $I$  в витке и радиус  $R$  витка.

2.43 Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $0,1$  Тл. Определить угловую скорость вращения электрона.

2.44 Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $0,2$  Тл. Определить угловую скорость вращения протона.

2.45 Электрон, обладая скоростью  $10$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля равна  $0,1$  мТл. Определить нормальное и тангенциальное ускорения электрона.

2.46 Протон, обладая скоростью  $5$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля равна  $0,2$  мТл. Определить нормальное и тангенциальное ускорения протона.

2.47 В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции движется прямой проводник длиной  $30$  см. При этом разность потенциалов, возникающая на его концах, составляет  $1 \cdot 10^{-5}$  В. Определить силу Лоренца, действующую на свободный электрон проводника.

2.48 Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 500$  В, движется параллельно прямолинейному длинному проводнику на расстоянии  $r = 1$  см от него. Определить силу, действующую на электрон, если через проводник пропустить ток  $I = 15$  А.

2.49. Протон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 400$  В, влетел в однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 1$  мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найти радиус окружности, по которой будет двигаться протон.

2.50 Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 600$  В, влетает в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,3$  мТл, перпендикулярное направлению его движения. Определить радиус кривизны траектории частицы и период его обращения в магнитном поле.

2.51 Электрон, обладая скоростью  $v = 1$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле, напряженность которого составляет  $1,5$  кА/м, под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям магнитной индукции и начинает двигаться по спирали. Определить шаг спирали и радиус витка спирали.

2.52 Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,2$  мТл по винтовой линии, радиус которой равен  $3$  см, а шаг  $h = 9$  см. Определить скорость электрона.

2.53 Электрон влетел в однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 2$  мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции и движется по окружности радиусом  $R = 10$  см. Определить магнитный момент  $p_m$  эквивалентного кругового тока.

2.54 Определить, при какой скорости пучок заряженных частиц, двигаясь перпендикулярно скрещенным под прямым углом однородным электрическому ( $E = 100$  кВ/м) и магнитному ( $B = 50$  мТл) полям, не отклоняется.

2.55 Найти скорость  $\alpha$ -частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрические и магнитные поля, не испытывает никакого отклонения. Напряженность магнитного поля  $2$  кА/м, напряженность электрического поля  $6,28$  кВ/м. Скорость  $\alpha$ -частицы перпендикулярна к линиям напряженности того и другого полей.

2.56 Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,02$  Тл по окружности радиусом  $R = 10$  см. Определить импульс  $p$  иона.

2.57  $\alpha$ -частица, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 800$  В, влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению его

движения. Радиус кривизны траектории частицы  $r = 10$  см. Определить величину индукции магнитного поля.

2.58 Протон влетает в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,03$  Тл под углом  $\alpha = 45^\circ$  к направлению поля и движется по винтовой линии, радиус которой  $r = 2,12$  см. Какова кинетическая энергия частицы?

2.59 Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 20$  А,  $I_2 = 25$  А, текущие в одном направлении, и ток  $I_3 = 30$  А, текущий в противоположном направлении.

2.60 Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 20$  А,  $I_2 = 35$  А, текущие в одном направлении, и токи  $I_3 = I_4 = 20$  А, текущие в противоположном направлении.

2.61 На железное кольцо намотано в один слой  $N = 100$  витков провода. Средний диаметр кольца  $d = 20$  см. Определить магнитную проницаемость  $\mu$  железа, если при силе тока  $I_1 = 0,5$  А в обмотке магнитная индукция  $B_1 = 1$  Тл, а при  $I_2 = 5$  А —  $B_2 = 1,28$  Тл.

2.62 Стальной брусок внесли в магнитное поле напряженностью  $H = 1600$  А/м. Определить намагниченность  $J$  стали, если магнитная индукция  $B = 1,25$  Тл.

2.63 Соленоид индуктивностью  $L = 1,5$  мГн имеет длину  $l = 30$  см, площадь поперечного сечения  $S = 15$  см<sup>2</sup> и число витков  $N = 500$ . По нему протекает ток  $I = 1$  А. Определить магнитную индукцию и намагниченность внутри соленоида, если он находится в диамагнитной среде.

2.64 По круговому контуру радиусом  $r = 40$  см, погруженному в жидкий кислород, являющийся парамагнетиком с магнитной восприимчивостью  $\chi = 1,9 \cdot 10^{-6}$ , течет ток  $I = 1$  А. Определить намагниченность в центре витка.

2.65 Соленоид длиной 0,3 м содержит 1000 витков, намотанных на картонный каркас. Определить индукцию магнитного поля внутри соленоида, если сопротивление его обмотки 100 Ом, а напряжение на его концах 60 В.

2.66 Найти магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый соленоидом сечением  $S = 10$  см<sup>2</sup>, если он имеет  $n = 20$  витков на каждый сантиметр его длины при силе тока  $I = 1$  А. Сердечник немагнитный.

2.67 Плоский контур площадью  $S = 25$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,03$  Тл. Определить магнитный по-

ток  $\Phi$ , пронизывающий контур, если его плоскость составляет угол  $\beta = 30^\circ$  с линиями индукции.

2.68 Соленоид сечением  $S = 16 \text{ см}^2$  и длиной  $l = 1 \text{ м}$  содержит  $N = 1000$  витков, намотанных на картонный каркас. Вычислить потоко-сцепление  $\Psi$  при силе тока в обмотке  $I = 5 \text{ А}$ .

2.69 В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,01 \text{ Тл}$  находится прямой провод длиной  $l = 10 \text{ см}$ , расположенный перпендикулярно линиям индукции. По проводу течет ток  $I = 1 \text{ А}$ . Под действием сил поля провод переместился на расстояние  $a = 3 \text{ см}$ . Найти работу  $A$  сил поля.

2.70 Круговой контур радиусом  $R = 5 \text{ см}$  помещен в однородное магнитное поле, индукция которого  $B = 70 \text{ мТл}$ . Плоскость контура перпендикулярна к силовым линиям. По контуру протекает постоянный ток  $I = 1 \text{ А}$ . Какую работу  $A$  надо совершить, чтобы повернуть контур на  $\varphi = 90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

2.71 Определить магнитный поток через площадь поперечного сечения катушки без сердечника, имеющей на каждом сантиметре длины 10 витков. Радиус катушки  $R = 2 \text{ см}$ , сила тока в ней  $I = 2 \text{ А}$ .

2.72. Внутри соленоида с числом витков  $N = 600$  с сердечником ( $\mu = 200$ ) напряженность магнитного поля  $H = 10 \text{ кА/м}$ . Площадь поперечного сечения сердечника  $S = 10 \text{ см}^2$ . Определить индукцию магнитного поля внутри соленоида и потоко-сцепление.

2.73. В однородное магнитное поле напряженностью  $10 \text{ кА/м}$  помещена квадратная рамка со стороной  $10 \text{ см}$ . Плоскость рамки составляет с направлением магнитного поля угол  $60^\circ$ . Определить магнитный поток, пронизывающий рамку.

2.74 Определить работу, совершаемую при перемещении проводника длиной  $l = 0,2 \text{ м}$ , по которому течет ток  $I = 5 \text{ А}$ , в перпендикулярном магнитном поле напряженностью  $H = 80 \text{ кА/м}$ , если перемещение проводника  $a = 0,5 \text{ м}$ .

2.75 На расстоянии  $a = 1 \text{ м}$  от длинного прямого провода с током  $I = 1 \text{ кА}$  находится кольцо радиусом  $r = 1 \text{ см}$ . Кольцо расположено так, что пронизывающий его магнитный поток максимален. Определить количество электричества  $q$ , которое протечет по кольцу, когда ток в проводе будет выключен. Сопротивление кольца  $R = 10 \text{ Ом}$ . В пределах кольца поле считать однородным.

2.76 Соленоид содержит  $N = 100$  витков. Площадь сечения сердечника  $S = 10 \text{ см}^2$ . По обмотке протекает ток, создающий поле с ин-



дукцией  $B = 1,5$  Тл. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающей в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за время  $t = 0,5$  мс.

2.77 Индуктивность соленоида при длине  $l = 1$  м и площади поперечного сечения  $S = 20$  см<sup>2</sup> равна  $L = 0,4$  мГн. При какой силе тока в соленоиде объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоида будет равной  $w = 0,1$  Дж/м<sup>3</sup>?

2.78 Тороид с немагнитным сердечником содержит  $n = 20$  витков на 1 см длины. Определить объемную плотность энергии магнитного поля внутри тороида, если по его обмотке протекает ток  $I = 3$  А.

2.79 Обмотка тороида с немагнитным сердечником содержит  $n = 10$  витков на 1 см длины. При какой силе тока в обмотке объемная плотность энергии станет равной  $w = 1$  Дж/м<sup>3</sup>?

2.80 По обмотке соленоида индуктивностью  $L = 3$  мГн, находящегося в диамагнитной среде, течет ток  $I = 0,4$  А. Соленоид имеет длину  $l = 45$  см, площадь поперечного сечения  $S = 10$  см<sup>2</sup> и число витков  $N = 1000$ . Определить магнитную индукцию и намагниченность внутри соленоида.

2.81 Материальная точка совершает гармонические колебания с амплитудой 25 см. Определить ее максимальное ускорение при условии, что максимальная скорость равна 50 см/с. Написать уравнение колебаний для нулевой начальной фазы.

2.82 Уравнение колебаний материальной точки массой  $m = 5$  г имеет вид:  $x = A \cdot \cos \omega t$ , где  $A = 10$  см,  $\omega = 5$  рад/с. Определить максимальные значения ее потенциальной энергии и возвращающей силы.

2.83 Для материальной точки массой  $m = 10$  г, совершающей колебания по закону  $x = A \cdot \cos \omega t$ , где  $A = 8$  см,  $\omega = 2\pi/3$  рад/с, найти полную энергию и возвращающую силу в момент времени  $t = 3$  с.

2.84 Материальная точка совершает гармонические колебания с периодом  $T = 6$  с, начальным смещением  $x_0 = 6$  см и максимальным значением ускорения  $a_m = 10$  см/с<sup>2</sup>. Написать уравнение колебаний.

2.85 Максимальное ускорение точки, совершающей гармонические колебания,  $a_m = 31,4$  м/с<sup>2</sup>, а максимальная скорость –  $v_m = 6$  м/с. Определить период и амплитуду колебаний.

2.86 Определить максимальное ускорение материальной точки, совершающей гармонические колебания с периодом  $T = 10$  с при условии, что ее максимальная скорость  $v_m = 4$  м/с.

2.87 Длина одного математического маятника на 60 см больше второго, а частота его колебаний в 3 раза меньше. Определить их длины.

2.88. Груз массой 1 кг, подвешенный на пружине, совершает 15 колебаний за 10 с. Определить ее жесткость.

2.89 Определить приведенную длину и период колебаний легкого стержня длиной  $L = 0,4$  м, на котором закреплены два одинаковых груза: один – в середине стержня, другой – на его конце. Стержень с грузами закреплен на горизонтальной оси, проходящей через свободный конец.

2.90 Определить период колебаний стержня длиной  $L = 1$  м около горизонтальной оси, перпендикулярной стержню и проходящей через один из его концов.

2.91 Определить частоту колебаний диска радиусом  $R = 20$  см относительно горизонтальной оси, проходящей через образующую диска.

2.92 Определить период колебаний диска радиусом  $R = 25$  см относительно горизонтальной оси, проходящей через середину радиуса диска перпендикулярно его плоскости.

2.93 Определить частоту малых колебаний однородного шара радиусом  $R = 30$  см около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии  $l = 15$  см выше его центра.

2.94 Определить частоту колебаний шара радиусом  $R = 20$  см, подвешенного на нити, длина которой равна радиусу.

2.95 Тонкостенный цилиндр радиусом  $R = 10$  см закреплен на горизонтальной оси, проходящей через его образующую. Определить частоту и период колебаний цилиндра.

2.96 Определить жесткость пружины, если при колебаниях подвешенного на ней груза с амплитудой  $A = 10$  см его максимальная кинетическая энергия равна  $W_{k \max} = 3$  Дж.

2.97 Определить жесткость пружины и амплитуду колебаний подвешенного на ней груза, если максимальные значения его потенциальной энергии и возвращающей силы соответственно равны  $W_{p \max} = 20$  мДж и  $F_{\max} = 10$  мН.

2.98 Материальная точка массой  $m = 30$  г совершает гармонические колебания с периодом  $T = 1$  с и амплитудой  $A = 10$  см. Определить максимальную величину ее потенциальной энергии.

2.99 Материальная точка массой  $m = 10$  г совершает гармонические колебания с периодом  $T = 2$  с и амплитудой  $A = 6$  см. Определить максимальную величину ее потенциальной энергии.

2.100 Максимальные значения потенциальной энергии пружины и возвращающей силы соответственно равны  $W_{p \max} = 30$  мДж и  $F_{\max} = 12$  мН. Найти амплитуду колебаний подвешенного на ней груза.

2.101 При колебаниях подвешенного на пружине груза с амплитудой  $A = 0,1$  м его максимальная кинетическая энергия оказалась равной  $W_{k \max} = 2$  Дж. Найти жесткость пружины.

2.102. Найти максимальную величину потенциальной энергии материальной точки массой  $m = 0,02$  кг, которая совершает гармонические колебания с периодом  $T = 3$  с и амплитудой  $A = 0,05$  м.

2.103 Для материальной точки, совершающей гармонические колебания с периодом  $T = 15$  с, максимальная скорость  $v = 3$  м/с. Определить ее максимальное ускорение.

2.104 Найти полную энергию и возвращающую силу в момент времени  $t = 2$  с для материальной точки массой  $m = 5$  г, совершающей колебания по закону  $x = A \cos(\omega t)$ , где  $A = 0,1$  м,  $\omega = 2\pi/3$  рад/с.

2.105 Складываются два гармонических колебания одного направления с частотами  $\nu_1 = 500$  Гц и  $\nu_2 = 510$  Гц; амплитудами  $A_1 = 30$  см и  $A_2 = 40$  см. Определить максимальное и минимальное значения амплитуды результирующего колебания, а также частоту биений.

2.106 Определить частоту биений, образующихся при сложении двух гармонических колебаний одного направления: одного – с частотой  $\nu_1 = 2$  Гц, а другого – с периодом  $T_2 = 0,501$  с.

2.107 Биения образуются при сложении двух гармонических колебаний одного направления с периодами  $T_1 = 10^{-1}$  с и  $T_2 = 1,002 \cdot 10^{-1}$  с; амплитудами  $A_1 = 35$  см и  $A_2 = 25$  см. Определить частоту биений, а также максимальное и минимальное значения амплитуды.

2.108 Написать уравнение, определить амплитуду и начальную фазу результирующего колебания, возникающего при сложении двух колебаний одинаковых направлений и периода:  $x_1 = A \sin(\omega t)$  и  $x_2 = A \sin(\omega(t + \tau))$ ; при этом  $A = 2$  см;  $\omega = \pi$  рад/с;  $\tau = 0,3$  с.

2.109 Складываются два гармонических колебания одного направления с частотами  $\nu_1 = 800$  Гц и  $\nu_2 = 790$  Гц. Определить частоту биений, а также амплитуду второго колебания, если амплитуда первого –  $A_1 = 40$  см и максимальное значение амплитуды биений –  $A_{\max} = 100$  см.

2.110 Точка одновременно участвует в двух колебаниях одного направления –  $x_1 = A_1 \sin(\omega t)$  и  $x_2 = A_2 \cos(\omega t)$ , где  $A_1 = 3$  см;  $A_2$

= 6 см;  $\omega = \pi/2$  рад/с. Определить амплитуду, период и начальную фазу результирующего колебания.

2.111 Найти амплитуду и начальную фазу результирующего колебания при сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинакового периода с амплитудами  $A_1 = 20$  см и  $A_2 = 10$  см и начальными фазами  $\varphi_1 = \pi/3$  рад и  $\varphi_2 = \pi/4$  рад.

2.112. Определить максимальное и минимальное значения амплитуды биений при сложении двух гармонических колебаний одного направления с амплитудами  $A_1 = 70$  см и  $A_2 = 55$  см.

2.113 Начальные фазы двух складывающихся гармонических колебаний одного направления с одинаковыми периодами 1,5 с и амплитудами 5 см равны соответственно:  $\varphi_1 = \pi/2$  и  $\varphi_2 = \pi/3$ . Определить амплитуду результирующего колебания, его частоту и начальную фазу.

2.114 Точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях –  $x_1 = A_1 \sin(\omega t)$  и  $x_2 = A_2 \cos(\omega t)$ , где  $A_1 = 1$  см;  $A_2 = 2$  см;  $\omega = 1$  рад/с. Найти амплитуду результирующего колебания, его период и начальную фазу.

2.115 Период собственных незатухающих колебаний системы равен  $T = 1$  с, а добротность  $Q = 10$ . Определить период затухающих колебаний.

2.116 Период собственных незатухающих колебаний системы  $T = 1$  с, а логарифмический декремент затухания –  $\theta = 0,628$ . Определить период затухающих колебаний.

2.117 Математический маятник длиной  $l = 1$  м совершает колебания с периодом  $T = 3$  с. Определить коэффициент затухания в этом случае.

2.118 При совершении маятником колебаний с логарифмическим декрементом затухания  $\theta = 0,002$  амплитуда за время  $t = 5$  мин уменьшилась в 2 раза. Определить его длину.

2.119 Определить логарифмический декремент затухания маятника длиной  $l = 1$  м, если амплитуда его колебаний за время  $t = 10$  мин уменьшилась в 4 раза.

2.120 Найти добротность системы, если за  $t = 10$  мин амплитуда затухающих колебаний маятника длиной  $l = 1$  м уменьшилась в 3 раза.

2.121 Для контура, составленного из конденсатора емкостью  $C = 5$  мкФ, соленоида индуктивностью  $L = 0,23$  Гн и резистора сопротивлением  $R = 40$  Ом, определить логарифмический декремент затухания.

2.122 Найти сопротивление контура, состоящего из конденсатора емкостью  $C = 1$  мкФ и соленоида индуктивностью  $L = 20$  мГн, если период затухающих колебаний  $T = 1$  мс.

2.123 Определить сопротивление контура, состоящего из конденсатора емкостью  $C = 0,2$  мкФ и соленоида индуктивностью  $L = 6$  мГн, если амплитуда силы тока за время  $I_m = 1$  мс уменьшилась в 3 раза.

2.124 Контур состоит из катушки индуктивностью  $L = 4$  мГн и конденсатора емкостью  $C = 18$  мкФ. Добротность системы  $Q = 500$ . Определить, за какое время энергия колебаний уменьшится в 3 раза.

2.125 Как и во сколько раз отличаются скорости распространения звуковых волн в воздухе при температурах  $-30$  °С и  $+30$  °С?

2.126 Чему равна частота колебаний в электромагнитной волне, распространяющейся в немагнитной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,2$ . Длина волны  $\lambda = 20,2$  см.

2.127 В опыте Юнга расстояние от щелей до экрана  $l = 5$  м. Определить угловое расстояние между соседними светлыми полосами, если четвертая светлая полоса отстоит от центра экрана на расстоянии  $L = 5$  мм.

2.128 Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга  $d = 0,6$  мм при длине волны  $\lambda = 650$  нм. Определить расстояние от щелей до экрана, если на его ширине  $L = 1$  см укладывается  $N = 10$  светлых полос.

2.129 В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света  $d = 0,6$  мм, расстояние от них до экрана  $l = 5$  м. В желтом свете ширина темных полос  $\Delta x_1 = 5$  мм. Определить длину волны желтого света, а также ширину светлых полос, если использовать источник красного света с длиной волны  $\lambda_2 = 680$  нм.

2.130 Во сколько раз в опыте Юнга нужно изменить расстояние до экрана, чтобы 5-я светлая полоса новой интерференционной картины оказалась на том же месте, что и 3-я в прежней картине?

2.131. Если в опыте Юнга на пути одного из лучей поместить тонкую стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ), то центральная светлая полоса сместится в положение, занимаемое пятой темной полосой. Длина волны света  $\lambda = 0,5$  мкм. Определить толщину пластинки.

2.132 Монохроматический свет падает нормально на поверхность воздушного клина, причем расстояние между двумя соседними интерференционными полосами  $\Delta x_1 = 0,4$  мм. Определить расстояние между полосами, если пространство между пластинками, образующими клин, заполнить водой (показатель преломления  $n = 1,33$ ).

2.133 На стеклянный клин (показатель преломления  $n = 1,5$ ) нормально падает монохроматический свет (длина волны  $\lambda = 0,698$  мкм). Определить угол клина, если расстояние между двумя соседними минимумами  $\Delta x = 2$  мм.

2.134 Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda_0 = 0,7$  мкм, падающим нормально. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью, и наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус линзы  $R = 3$  м. Определить показатель преломления жидкости, если радиус второго светлого кольца  $r = 1,7$  мм.

2.135 Определить радиус 4-го темного кольца Ньютона при наблюдении в проходящем свете с длиной волны  $\lambda_0 = 532$  нм, если между линзой с радиусом кривизны  $R = 4$  м и плоской поверхностью, к которой она прижата, находится вода ( $n = 1,33$ ).

2.136 Найти частоту электромагнитной волны, если она распространяется в немагнитном веществе с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9$ , а расстояние между 3-м и 9-м узлами в образующейся при нормальном отражении от преграды стоячей волне  $\Delta x = 4,5$  мм.

2.137 Определить расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга, если на его ширине  $L = 3$  см укладывается  $N = 20$  светлых полос, а расстояние между двумя щелями  $d = 0,4$  мм при длине волны  $\lambda = 0,6$  мкм.

2.138 Найти длину волны света, если при падении плоской световой волны на бизеркало Френеля с углом  $\alpha = 2^\circ$  ширина интерференционной полосы на экране  $\Delta x = 0,55$  мм.

2.139 При падении плоской световой волны на бизеркало Френеля с углом  $\alpha = 1^\circ$  ширина интерференционной полосы на экране  $\Delta x = 0,6$  мм. Найти длину волны света.

2.140 Для каких углов падения в проходящем свете наблюдается максимум интерференции для плоскопараллельной пластинки с показателем преломления  $n = 1,5$  и толщиной  $d = 3,8$  мкм (длина волны  $\lambda = 740$  нм)?

2.141. Под какими углами падения плоскопараллельная пластинка с показателем преломления  $n = 1,45$  и толщиной  $d = 4$  мкм будет казаться красной в отраженном свете для длины волны  $\lambda = 720$  нм?

2.142 Определить наименьшую толщину просветляющей пленки, нанесенной на линзу из стекла (показатель преломления 1,65) для желтых лучей (длина волны  $\lambda = 600$  нм).

2.143 Определить минимальную толщину просветляющего покрытия с оптимальным показателем преломления, нанесенного на стекло с показателем преломления  $n = 1,5$ , для монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм.

2.144 Найти угловое расстояние между максимумами второго и третьего порядков при нормальном падении света с длиной волны  $\lambda = 0,585$  мкм на дифракционную решетку с периодом  $d = 0,002$  мм.

2.145 Период дифракционной решетки  $d = 1,5$  мкм. Свет с длиной волны  $\lambda = 0,53$  мкм падает на нее нормально. Определить угол дифракции, под которым образуется максимум наибольшего порядка.

2.146 Определить минимальное расстояние между двумя точками, находящимися на расстоянии 3 км от зрительной трубы с диаметром объектива 5,0 см, которое она может разрешить. Среднюю длину волны света считать равной 0,55 мкм.

2.147 Определить угол преломления для света, который падает на поверхность жидкости с показателем преломления  $n = 1,47$  под углом Брюстера.

2.148 Свет падает на поверхность жидкости с показателем преломления  $n = 1,65$  под углом Брюстера. Определить угол преломления для света

2.149 Найти угол преломления пучка света, падающего на поверхность жидкости под углом  $i_1 = 54^\circ$ , если отраженный пучок полностью поляризован.

2.150 Определить скорость света в кристалле каменной соли, если угол Брюстера при падении света из воздуха на этот кристалл равен  $57^\circ$ .

2.151 Свет падает из воздуха на поверхность кристалла под углом  $67^\circ$ . Определить угол между падающим и преломленным лучами, если отраженный свет полностью поляризован.

2.152. Чему равна степень поляризации частично поляризованного света, если амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в 3 раза больше амплитуды, соответствующей его минимальной интенсивности.

2.153 Определить степень поляризации частично поляризованного света, если амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в 2 раза больше амплитуды, соответствующей его минимальной интенсивности.

2.154 Найти, во сколько раз интенсивность поляризованного света больше интенсивности естественного для частично поляризованного

света со степенью поляризации  $P = 0,5$ , который представляет собой смесь естественного света с плоскополяризованным.

2.155 Определить отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной для частично поляризованного света со степенью поляризации  $P = 0,75$ .

2.156 Определить отношение максимальной амплитуды напряженности электрического поля к минимальной при вращении анализатора для падающего света со степенью поляризации  $P = 0,6$ .

2.157 Частично поляризованный свет со степенью поляризации  $P = 0,75$  представляет собой смесь естественного света с плоскополяризованным. Определить, во сколько раз амплитуда поляризованного света больше амплитуды естественного.

2.158 Для света со степенью поляризации  $P = 0,4$  определить отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной для частично поляризованного.

2.159 Определить степень поляризации частично поляризованного света, для которого при вращении анализатора максимальная амплитуда напряженности электрического поля составила  $A_{\max} = 26$  В/м, а минимальная –  $A_{\min} = 13$  В/м.

2.160 Плоскость поляризации монохроматического света поворачивается раствором глюкозы с массовой концентрацией  $C_1 = 0,21$  г/см<sup>3</sup>, находящимся в стеклянной трубке, на угол  $\varphi_1 = 24^\circ$ . Определить массовую концентрацию  $C_2$  глюкозы в другом растворе в такой же трубке, если он поворачивает плоскость поляризации на угол  $\varphi_2 = 18^\circ$ .

2.161 Степень черноты вольфрамовой спирали  $a = 0,3$ , а температура  $t = 2200$  °С. Определить ее площадь, если мощность излучения составляет  $P = 25$  Вт.

2.162 Шар радиусом  $R = 10$  см за время  $t = 5$  с излучает энергию  $W = 5$  кДж. Найти температуру шара, считая его серым телом со степенью черноты  $a = 0,25$ .

2.163 Максимум излучения зачерненного тела соответствует длине волны  $\lambda_m = 700$  нм. Определить его температуру и излучательность (энергетическую светимость).

2.164 Определить длину волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучательности абсолютно черного тела, и его излучательность, если температура  $T = 1,5$  кК.



2.165 Во сколько раз изменится излучательность абсолютно черного тела при уменьшении длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности излучательности, в 3 раза?

2.166 В астрономии Земля условно считается серым телом, имеющим температуру  $T = 280$  К. Определить степень черноты Земли, если ее излучательность  $R_e = 325$  кДж/(м<sup>2</sup>·ч).

2.167 Определить, какое количество энергии излучает абсолютно черное тело с поверхности площадью  $S = 5$  см<sup>2</sup> за время  $t = 4$  с, если максимум спектральной плотности излучательности приходится на длину волны  $\lambda_m = 450$  нм.

2.168 Температура внутренней поверхности муфельной печи  $T = 1200$  К, площадь поверхности открытого отверстия  $S = 25$  см<sup>2</sup>. Определить мощность излучения через отверстие и рассеиваемую мощность через стенки, если печь потребляет мощность  $P = 1$  кВт.

2.169 Температура тела  $t = 130$  °С. Определить степень черноты его поверхности, если с площади  $S = 4$  см<sup>2</sup> за время  $\Delta t = 5$  мин излучается энергия  $W = 166$  Дж.

2.170 Определить площадь поверхности абсолютно черного тела, если при длине волны, соответствующей максимуму излучения ( $\lambda_m = 0,6$  мкм), энергетический поток излучения составляет  $\Phi = 15$  кВт.

2.171 Эталон единицы силы света в системе СИ – кандела – представляет собой полный (излучающий волны всех длин) излучатель, поверхность которого площадью  $S = 0,5305$  мм<sup>2</sup> имеет температуру затвердевания платины  $t = 1063$  °С. Определить мощность излучателя.

2.172 На какую длину волны приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, если его излучательность  $R_e^* = 300$  кВт/м<sup>2</sup>?

2.173 Нагретая чугунная отливка при температуре  $t = 750$  °С излучает с поверхности площадью  $S = 5$  см<sup>2</sup> за время  $\tau = 10$  с энергию  $W = 200$  Дж. Определить коэффициент поглощения поверхности отливки, считая ее серым телом.

2.174 Температура верхних слоев звезды Сириус  $T = 10$  кК. Определить поток энергии, излучаемый с поверхности площадью  $S = 5$  км<sup>2</sup> этой звезды.

2.175 Максимум спектральной плотности излучательности яркой звезды Арктур приходится на длину волны  $\lambda_m = 0,58$  нм. Принимая,

что звезда излучает как черное тело, определить температуру ее поверхности и излучательность.

2.176 Как и во сколько раз изменилась длина волны, соответствующая максимуму испускательной способности в спектре серого тела, если мощность излучения при этом увеличилась в 16 раз?

2.177 Определить длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, движущегося со скоростью  $v = 10$  Мм/с.

2.178 Определить длину волны фотона, масса которого равна массе покоя протона.

2.179 Определить длину волны фотона, масса которого равна массе покоя электрона.

2.180 На цинковую пластинку падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 220$  нм и эффективной работой выхода электрона  $A = 3,74$  эВ. Определить максимальную скорость фотоэлектронов.

2.181 Удаленный от других тел натриевый шарик с эффективной работой выхода электрона  $A = 2,27$  эВ облучают монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 300$  нм. До какого максимального потенциала зарядится шарик, теряя электроны?

2.182 Фотон с энергией  $E = 10$  эВ падает на серебряную пластинку с эффективной работой выхода электрона  $A = 4,28$  эВ и вызывает фотоэффект. Определить максимальный импульс, который может получить пластинка.

2.183 На катод из натрия с эффективной работой выхода электрона  $A = 2,27$  эВ падают лучи с длиной волны  $\lambda = 250$  нм. Какое минимальное задерживающее напряжение надо приложить к фотоэлементу, чтобы фотоэффект не наблюдался?

2.184 При облучении металлического катода ультрафиолетовым светом с длиной волны  $\lambda = 250$  нм фототок начинает наблюдаться при задерживающем напряжении  $U = 0,96$  В. Определить длину волны, соответствующую красной границе для этого металла.

2.185 Фотон с длиной волны  $\lambda = 200$  нм падает на литиевую пластинку с эффективной работой выхода электрона  $A = 2,39$  эВ. Определить, какая погрешность допускается при определении максимального импульса, который может получить пластинка, если не учитывать импульс падающего фотона?

2.186 Нормально падающий свет создает давление на поверхность  $p = 0,5$  мкПа. Определить коэффициент отражения поверхности, если энергетическая освещенность  $E_c = 120$  Вт/м<sup>2</sup>.

2.187 Параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 662 \text{ нм}$ ) падает на зачерненную поверхность и производит на нее давление  $p = 0,3 \text{ мкПа}$ . Определить концентрацию фотонов в световом пучке.

2.188 На поверхность с коэффициентом отражения  $\rho = 0,7$  и площадью  $S = 5 \text{ см}^2$  падает нормально поток излучения  $\Phi_e = 1 \text{ Вт}$ . Определить давление и силу давления на эту поверхность.

2.189 Монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 550 \text{ нм}$  падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на нее с силой  $F = 8 \text{ нН}$ . Определить число фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

2.190 Давление монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 620 \text{ нм}$  на черную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно  $p = 0,1 \text{ мкПа}$ . Определить число фотонов, попавших за время  $\tau = 10 \text{ с}$  на поверхность площадью  $S = 5 \text{ см}^2$ .

2.191 Найти, какую часть массы нейтрального атома плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  составляет масса его электронной оболочки.

2.192 Найти, какую часть массы нейтрального атома радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  составляет масса его электронной оболочки.

2.193 Найти, какую часть массы нейтрального атома свинца  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$  составляет масса его электронной оболочки.

2.194 Оценить, какую часть массы ядра лития  ${}^7_3\text{Li}$  составляет масса нейтронов.

2.195 Определить число протонов в ядре изотопа кремния  ${}^{31}_{14}\text{Si}$ .

2.196. Указать, какое число протонов содержится в ядре изотопа йода  ${}^{131}_{53}\text{I}$ .

2.197. Определить энергию связи, приходящуюся на один нуклон, для ядра изотопа радия  ${}^{219}_{88}\text{Ra}$ .

2.198 Определить массу ядра лития, если масса нейтрального атома лития равна  $7,01601 \text{ а. е. м}$ .

2.199 Определить значение удельной энергии связи для ядра изотопа аргона  ${}^{41}_{18}\text{Ar}$ .

2.200 Рассчитать концентрацию нуклонов в ядре, полагая, что коэффициент пропорциональности  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ .

2.201. Два ядра  ${}^{10}_5\text{B}$  сблизилась до расстояния, равного диаметру ядра (коэффициент пропорциональности  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ ). Считая, что масса и заряд равномерно распределены по объему ядра, определить силу кулоновского отталкивания.

2.202 Определить плотность вещества в атомном ядре (коэффициент пропорциональности  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-15}$  м), пренебрегая дефектом массы и приближенно считая, что массы протонов и нейтронов равны.

2.203 Используя соотношение  $Z \approx A/2$ , которое справедливо для многих легких ядер (коэффициент пропорциональности  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-15}$  м), определить среднюю объемную плотность заряда ядра.

2.204 Определить, какое из ядер,  ${}_{14}^{31}\text{Si}$  или  ${}_{15}^{31}\text{P}$ , наиболее устойчиво? Для ответа определите их энергии связи.

2.205 Вычислить дефект массы и энергию связи ядра свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ .

2.206 Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон, и дефект массы для ядра  ${}_{14}^{31}\text{Si}$ .

2.207 Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон, и дефект массы для ядра  ${}_{20}^{44}\text{Ca}$ .

2.208 Вычислить дефект массы и энергию связи ядра алюминия  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ .

2.209 Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон, и дефект массы для ядра  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ .

2.210 Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон, и дефект массы для ядра  ${}_{7}^{14}\text{N}$ .

2.211. Вычислить энергию связи и дефект массы ядра атома гелия  ${}_{2}^{4}\text{He}$ .

2.212. Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон, и дефект массы для ядра кислорода  ${}_{8}^{16}\text{O}$ .

2.213 Вычислить дефект массы и энергию связи ядра лития  ${}_{3}^{7}\text{Li}$ .

2.214 Вычислить энергию связи и дефект массы ядра атома серебра  ${}_{47}^{108}\text{Ag}$ .

2.215. Вычислить энергию связи и дефект массы ядра атома висмута  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ .

2.216 Определить, какое из ядер,  ${}_{1}^{3}\text{H}$  или  ${}_{2}^{3}\text{He}$ , наиболее устойчиво? Для ответа определите их энергии связи.

2.217 Определить энергию связи и дефект массы ядра сверхтяжелого водорода  ${}_{1}^{3}\text{H}$ .

2.218 Определить энергию связи и дефект массы ядра тяжелого водорода  ${}^2_1\text{H}$ .

2.219 Какая часть начального количества атомов распадётся за один год в радиоактивном изотопе тория  ${}^{228}_{90}\text{Th}$ ?

2.220 Определить постоянную распада изотопа радия  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ .

2.221 Определить постоянную распада изотопа радия  ${}^{219}_{88}\text{Ra}$ .

2.222 Какая часть начального количества атомов радиоактивного актиния  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  останется через 15 суток?

2.223 Какая часть начального количества атомов радиоактивного актиния  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  останется через 5 суток?

2.224 За какое время распадается  $2/5$  начального количества атомов радиоактивного изотопа, если период его полураспада  $T = 24$  ч?

2.225 За время  $t = 9$  суток распалось  $7/8$  начального количества атомов радиоактивного изотопа. Определить период его полураспада.

2.226 Какая часть начального количества атомов радиоактивного изотопа распадается за время, в три раза большее среднего времени жизни этого изотопа?

2.227 Определить, через сколько лет распадётся 90 % атомов стронция  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ ?

2.228 Определить, через сколько лет распадётся половина атомов стронция  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ ?

2.229 На сколько процентов снизится активность изотопа иридия  ${}^{192}_{77}\text{Ir}$  за время  $t = 30$  сут?

2.230 Во сколько раз снизится активность изотопа иода  ${}^{131}_{53}\text{I}$  за 5 суток?

2.231 Во сколько раз снизится активность изотопа тория  ${}^{228}_{90}\text{Th}$  за 1 год?

2.232 Радиоизотоп  ${}^{32}_{15}\text{P}$  образуется в ядерном реакторе со скоростью  $q = 2,7 \cdot 10^9$  ядер/с. Через какое время после начала образования этого радиоизотопа его активность станет  $A = 10^9$  Бк?

2.233 Определить промежуток времени, в течение которого активность изотопа стронция  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  уменьшится в  $k_1 = 10$  раз?

2.234 Определить промежуток времени, в течение которого активность изотопа стронция  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  уменьшится в  $k_2 = 100$  раз?

2.235 Ядро изотопа урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  захватило нейтрон. Определить, какое ядро образовалось в результате этого радиационного захвата.

2.236 Определить число  $\Delta N$  атомов, распадающихся в радиоактивном изотопе за время  $t = 10$  с, если его начальная активность  $A_0 = 0,1$  МБк, а период полураспада  $T = 25$  с.

2.237 Активность препарата уменьшилась в  $k = 250$  раз. Скольким периодам полураспада равен протекший промежуток времени?

2.238 За промежуток времени  $t = 1$  сут активность изотопа уменьшилась от  $A_1 = 118$  ГБк до  $A_2 = 7,4$  ГБк. Определить период полураспада этого нуклида.

2.239 Определить активность препарата, содержащего радиоактивный фосфор  ${}_{15}^{32}\text{P}$  массой  $m = 1$  мг.

2.240 Вычислить удельную активность кобальта  ${}_{27}^{60}\text{Co}$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

#### 1 Некоторые физические постоянные (округленные значения)

|  |  |
|--|--|
| Ускорение свободного падения.....        | $g = 9,81 \text{ м/с}^2$   |
| Гравитационная постоянная.....           | $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$   |
| Скорость света в вакууме.....            | $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  |
| Постоянная Больцмана.....                | $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$   |
| Элементарный заряд.....                  | $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  |
| Масса покоя электрона.....               | $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$   |
| Масса покоя протона.....                 | $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$   |
| Масса покоя нейтрона.....                | $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$   |
| Электрическая постоянная.....            | $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$   |
| Магнитная постоянная.....                | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  |
| Магнетон Бора.....                       | $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}$   |
| Постоянная Стефана-Больцмана.....        | $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$   |
| Первая постоянная Вина.....              | $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$   |
| Вторая постоянная Вина.....              | $C = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$  |
| Постоянная Планка.....                   | $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$<br>$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ |
| Комптоновская длина волны электрона..... | $\lambda = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$  |
| Первый борковский радиус.....            | $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$  |
| Энергия ионизации атома водорода.....    | $E_i = 2,16 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$   |
| Постоянная Ридберга.....                 | $R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$   |
| Атомная единица массы.....               | $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  |

#### 2 Плотность твёрдых тел и жидкостей

| Вещество | $\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$ | Вещество               | $\rho, 10^3 \text{ г/м}^3$ |
|----------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Алюминий | 2,71                        | Вода (при 4 °С)        | 1,00                       |
| Железо   | 7,80                        | Глицерин               | 1,26                       |
| Медь     | 8,93                        | Дизельное топливо      | 1,00                       |
| Свинец   | 11,3                        | Масло трансформаторное | 0,90                       |
| Серебро  | 10,5                        | Керосин                | 0,80                       |
| Эбонит   | 1,2                         | Масло касторовое       | 0,90                       |
| Магний   | 1,74                        | Спирт                  | 0,83                       |

#### 3 Диэлектрическая проницаемость

| Вещество               | Диэлектрическая проницаемость | Вещество | Диэлектрическая проницаемость |
|------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|
| Вода                   | 81,0                          | Парафин  | 2,0                           |
| Масло трансформаторное | 2,2                           | Стекло   | 7,0                           |
| Гетинакс               | 2,4                           | Янтарь   | 2,8                           |

#### 4 Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

| Парамагнетики   | $\chi, 10^{-6}$ | Диамагнетики  | $\chi, 10^{-6}$ |
|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Азот            | 0,013           | Водород       | -0,063          |
| Алюминий        | 23              | Бензол        | -7,5            |
| Воздух          | 0,38            | Висмут        | -176            |
| Вольфрам        | 176             | Вода          | -9,0            |
| Жидкий кислород | 3400            | Каменная соль | -12,6           |
| Кислород        | 1,9             | Кварц         | -15,1           |
| Марганец        | 121             | Медь          | -10,3           |
| Платина         | 360             | Стекло        | -12,3           |

#### 5 Показатель преломления

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

#### 6 Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов

| Элемент  | Символ изотопа        | Период полураспада    | Элемент  | Символ изотопа         | Период полураспада    |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------|------------------------|-----------------------|
| Углерод  | $^{14}_6\text{C}$     | 5568 лет              | Цезий    | $^{134}_{55}\text{Cs}$ | 2,06 года             |
| Натрий   | $^{22}_{11}\text{Na}$ | 2,6 года              |          | $^{137}_{55}\text{Cs}$ | 30,17 лет             |
|          | $^{24}_{11}\text{Na}$ | 15 ч                  | Иридий   | $^{192}_{77}\text{Ir}$ | 75 сут                |
| Магний   | $^{23}_{12}\text{Mg}$ | 11 с                  | Висмут   | $^{210}_{83}\text{Bi}$ | 5,01 сут              |
|          | $^{27}_{12}\text{Mg}$ | 10 мин                | Полоний  | $^{210}_{84}\text{Po}$ | 138,4 сут             |
| Фосфор   | $^{32}_{15}\text{P}$  | 14,3 сут              | Радон    | $^{222}_{86}\text{Rn}$ | 3,8 сут               |
| Калий    | $^{40}_{19}\text{K}$  | $1,32 \cdot 10^9$ лет | Радий    | $^{219}_{88}\text{Ra}$ | $10^{-3}$ с           |
| Кобальт  | $^{58}_{27}\text{Co}$ | 71,3 сут              |          | $^{226}_{88}\text{Ra}$ | 1620 лет              |
|          | $^{60}_{27}\text{Co}$ | 5,2 года              | Актиний  | $^{225}_{89}\text{Ac}$ | 10 сут                |
| Бром     | $^{82}_{35}\text{Br}$ | 36 ч                  | Торий    | $^{228}_{90}\text{Th}$ | 1,9 года              |
| Стронций | $^{89}_{38}\text{Sr}$ | 51 сут                | Уран     | $^{235}_{92}\text{U}$  | $7,1 \cdot 10^8$ лет  |
|          | $^{90}_{38}\text{Sr}$ | 28,9 лет              |          | $^{238}_{92}\text{U}$  | $4,5 \cdot 10^9$ лет  |
| Иод      | $^{131}_{53}\text{I}$ | 8 сут                 | Плутоний | $^{239}_{94}\text{Pu}$ | $2,44 \cdot 10^4$ лет |



**7 Относительные атомные массы (округленные средние значения)  $A$  и порядковые номера  $Z$  некоторых элементов**

| Элемент  | Символ | $A$ | $Z$ |
|----------|--------|-----|-----|
| Азот     | N      | 14  | 7   |
| Алюминий | Al     | 27  | 13  |
| Аргон    | Ar     | 40  | 18  |
| Барий    | Ba     | 137 | 56  |
| Бор      | B      | 11  | 5   |
| Бром     | Br     | 80  | 35  |
| Ванадий  | V      | 51  | 23  |
| Висмут   | Bi     | 209 | 83  |
| Водород  | H      | 1   | 1   |
| Вольфрам | W      | 184 | 74  |
| Гелий    | He     | 4   | 2   |
| Железо   | Fe     | 56  | 26  |
| Золото   | Au     | 197 | 79  |
| Иод      | I      | 127 | 53  |
| Калий    | K      | 39  | 19  |
| Кальций  | Ca     | 40  | 20  |
| Кислород | O      | 16  | 8   |
| Кобальт  | Co     | 59  | 27  |
| Кремний  | Si     | 28  | 14  |
| Магний   | Mg     | 24  | 12  |
| Марганец | Mn     | 55  | 25  |
| Молибден | Mo     | 96  | 42  |
| Медь     | Cu     | 64  | 29  |
| Натрий   | Na     | 23  | 11  |
| Неон     | Ne     | 20  | 10  |
| Никель   | Ni     | 59  | 28  |
| Олово    | Sn     | 119 | 50  |
| Платина  | Pt     | 195 | 78  |
| Радий    | Ra     | 226 | 88  |
| Радон    | Rn     | 222 | 86  |
| Ртуть    | Hg     | 201 | 80  |
| Свинец   | Pb     | 207 | 82  |
| Сера     | S      | 32  | 16  |
| Серебро  | Ag     | 108 | 47  |
| Титан    | Ti     | 48  | 22  |
| Фосфор   | P      | 31  | 15  |
| Цинк     | Zn     | 65  | 30  |
| Углерод  | C      | 12  | 6   |

|      |    |     |    |
|------|----|-----|----|
| Уран | U  | 238 | 92 |
| Хлор | Cl | 35  | 17 |

### 8 Массы атомов некоторых изотопов

| Элемент | Символ изотопа   | Масса, а. е. м. | Элемент  | Символ изотопа          | Масса, а. е. м. |
|---------|------------------|-----------------|----------|-------------------------|-----------------|
| Водород | ${}^1_1\text{H}$ | 1,00782         | Кислород | ${}^{16}_8\text{O}$     | 15,99491        |
|         | ${}^2_1\text{H}$ | 2,01410         |          | ${}^{17}_8\text{O}$     | 16,99913        |
|         | ${}^3_1\text{H}$ | 3,01604         | Натрий   | ${}^{23}_{11}\text{Na}$ | 22,98977        |

|          |                     |          |          |                          |           |
|----------|---------------------|----------|----------|--------------------------|-----------|
| Гелий    | ${}^3_2\text{He}$   | 3,01602  | Алюминий | ${}^{27}_{13}\text{Al}$  | 26,98154  |
|          | ${}^4_2\text{He}$   | 4,00260  | Кремний  | ${}^{29}_{14}\text{Si}$  | 28,97649  |
| Литий    | ${}^6_3\text{Li}$   | 6,01512  |          | ${}^{31}_{14}\text{Si}$  | 30,97536  |
|          | ${}^7_3\text{Li}$   | 7,01600  | Фосфор   | ${}^{29}_{15}\text{P}$   | 28,98180  |
| Бериллий | ${}^7_4\text{Be}$   | 7,01692  |          | ${}^{30}_{15}\text{P}$   | 29,97831  |
|          | ${}^8_4\text{Be}$   | 8,00530  |          | ${}^{31}_{15}\text{P}$   | 30,97376  |
| Бор      | ${}^9_4\text{Be}$   | 9,01218  | Калий    | ${}^{39}_{19}\text{K}$   | 38,96370  |
|          | ${}^9_5\text{B}$    | 9,01332  | Кальций  | ${}^{44}_{20}\text{Ca}$  | 43,95548  |
|          | ${}^{10}_5\text{B}$ | 10,01293 | Марганец | ${}^{54}_{25}\text{Mn}$  | 53,94035  |
|          | ${}^{11}_5\text{B}$ | 11,00930 | Железо   | ${}^{54}_{26}\text{Fe}$  | 53,93961  |
| Углерод  | ${}^{10}_6\text{C}$ | 10,01685 |          | ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  | 55,93494  |
|          | ${}^{12}_6\text{C}$ | 12,00000 | Серебро  | ${}^{104}_{47}\text{Ag}$ | 103,90841 |
|          | ${}^{13}_6\text{C}$ | 13,00335 | Свинец   | ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ | 205,97447 |
|          | ${}^{14}_6\text{C}$ | 14,00324 | Полоний  | ${}^{210}_{84}\text{Po}$ | 209,98288 |
| Азот     | ${}^{13}_7\text{N}$ | 13,00573 | Радон    | ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ | 222,01760 |
|          | ${}^{14}_7\text{N}$ | 14,00307 | Уран     | ${}^{235}_{92}\text{U}$  | 235,04394 |
| Кислород | ${}^{15}_7\text{N}$ | 15,00010 |          | ${}^{238}_{92}\text{U}$  | 238,05081 |
|          | ${}^{15}_8\text{O}$ | 15,00307 | Плутоний | ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ | 239,05217 |

### 9 Масса и энергия покоя некоторых частиц

| Частица  | Масса покоя            |          | Энергия покоя         |       |
|----------|------------------------|----------|-----------------------|-------|
|          | кг                     | а. е. м. | Дж                    | МэВ   |
| Электрон | $9,11 \cdot 10^{-31}$  | 0,00055  | $8,16 \cdot 10^{-14}$ | 0,511 |
| Протон   | $1,672 \cdot 10^{-27}$ | 1,00728  | $1,5 \cdot 10^{-10}$  | 938   |

|                   |                        |         |                       |      |
|-------------------|------------------------|---------|-----------------------|------|
| Нейтрон           | $1,675 \cdot 10^{-27}$ | 1,00867 | $1,51 \cdot 10^{-10}$ | 939  |
| Дейтрон           | $3,35 \cdot 10^{-27}$  | 2,01355 | $3,00 \cdot 10^{-10}$ | 1876 |
| $\alpha$ -частица | $6,64 \cdot 10^{-27}$  | 4,00149 | $5,96 \cdot 10^{-10}$ | 3733 |

**10 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования**

| Приставка   |              |           | Приставка   |              |            |
|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|------------|
| Обозначение | Наименование | Множитель | Обозначение | Наименование | Множитель  |
| Э           | экса         | $10^{18}$ | д           | деци         | $10^{-1}$  |
| П           | пэта         | $10^{15}$ | с           | санتي        | $10^{-2}$  |
| Т           | тера         | $10^{12}$ | м           | милли        | $10^{-3}$  |
| Г           | гига         | $10^9$    | мк          | микро        | $10^{-6}$  |
| М           | мега         | $10^6$    | н           | нано         | $10^{-9}$  |
| к           | кило         | $10^3$    | п           | пико         | $10^{-12}$ |
| г           | гекта        | $10^2$    | ф           | фемто        | $10^{-15}$ |
| да          | дека         | $10^1$    | а           | атто         | $10^{-18}$ |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| Общие методические указания.....   | 4   |
| Вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы..... | 7   |
| Магнетизм.....   | 7   |
| Колебания и волны.....   | 8   |
| Волновая оптика.....   | 9   |
| Квантовая оптика.....  | 9   |
| Физика атома и ядра.....   | 9   |
| Список рекомендуемой литературы.....                                     | 0   |
| Магнетизм (Сведения из тЕории).....                                      | 11  |
| колебания и волны.....   | 19  |
| ОПТИКА.....  | 32  |
| Физика атома и ядра.....   | 45  |
| Примеры решения задач.....   | 53  |
| Задачи к контрольной работе № 2.....                                     | 78  |
| Основные физические величины.....  | 101 |

*ДЕЛИКАТНАЯ Ирина Олеговна*  
*РОДНЕНКОВ Владимир Георгиевич*

### **ФИЗИКА ДЛЯ ЭКОНОМИСТОВ**

#### **Часть 2**

#### **Магнетизм. Колебания и волны. Квантовая оптика. Физика атома и ядра**

Учебно-методическое пособие

Редактор *И. И. Эвентов*  
Технический редактор *В. Н. Кучерова*  
Компьютерный набор и верстка – *В. Г. Родненков*

Подписано в печать 14.01.2014 г. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,21. Тираж 150.  
Зак. №            Изд. № 101

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный университет транспорта:  
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.  
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.  
256653, г. Гомель, ул. Кирова, 34