

Кафедра «Экспериментальная и теоретическая физика»

СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ
ЗАНЯТИЙ И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты»,
1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»,
1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника»,
1-38 02 01 «Информационно-измерительная техника и технологии»,
1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»,
1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»,
1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства»,
1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация»,
1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества
и диагностики состояния объектов»

В 2 частях

Часть 2

*Рекомендовано учебно-методическими объединениями по образованию
в областях приборостроения и обеспечения качества*

Минск
БНТУ
2021

УДК 53(076.1)(075.8)

ББК 22.33я7

С23

Составители:

*К. В. Юмашев, Д. С. Бобученко, Ю. А. Бумай, В. В. Красовский,
С. А. Манего, Л. П. Свирина, В. В. Чёрный*

Рецензенты:

зав. кафедрой общей физики физического факультета Белорусского
государственного университета, канд. физ.-мат. наук,
доцент *А. И. Слободянюк*;

доцент кафедры физики УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», канд. техн. наук, доцент *Ю. И. Савилова*

Сборник вопросов и задач для практических занятий и конт-
С23 рольных работ по физике: учебно-методическое пособие для сту-
дентов специальностей 1-38 01 01 «Механические и электромеха-
нические приборы и аппараты», 1-38 01 02 «Оптико-электронные
и лазерные приборы и системы», 1-38 01 04 «Микро- и наносистем-
ная техника», 1-38 02 01 «Информационно-измерительная техника
и технологии», 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппа-
раты и системы», 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопас-
ности», 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного произ-
водства», 1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация»,
1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики со-
стояния объектов»: в 2 ч. / сост.: К. В. Юмашев [и др.]. – Минск:
БНТУ, 2021. – Ч. 2. – 94 с.

ISBN 978-985-583-661-3 (Ч. 2).

Учебно-методическое пособие содержит задачи и вопросы по следующим разде-
лам курса общей физики: «Магнетизм», «Оптика. Элементы атомной и ядерной фи-
зики». Приведены примеры решения задач и необходимые справочные данные.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов инженерных специ-
альностей, изучающих соответствующие разделы курса общей физики.

Часть 1 данного издания вышла в 2021 году.

УДК 53 (076.1) (075.8)

ББК 22.33я7

ISBN 978-985-583-661-3 (Ч. 2)

ISBN 978-985-583-564-7

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания к выполнению контрольных работ	4
Разделы «Электромагнетизм», «Оптика, элементы атомной и ядерной физики» рабочей программы курса общей физики.....	6
Рекомендуемая литература	9
Учебные материалы	11
1. Электромагнетизм	11
1.1. Основные понятия и формулы	11
1.2. Контрольные задачи к разделу 1.....	16
2. Оптика. Элементы атомной и ядерной физики	37
2.1. Основные понятия и формулы	37
2.2. Контрольные задачи к разделу 2.....	52
3. Таблицы вариантов контрольных работ.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ	90

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. За время изучения курса общей физики студент заочник должен предоставить в учебное заведение, в зависимости от специальности, от трех до шести контрольных работ (по разделам «Механика», «Молекулярная физика и термодинамика» – одну или две контрольные работы). Работа сдается на проверку не позднее, чем за месяц до начала экзаменационной сессии.

2. Перед выполнением контрольных работ необходимо ознакомиться с материалом, указанным в рабочей программе, изучить соответствующие разделы рекомендованной учебной литературы. Необходимо иметь в виду, что формулы и основные положения, приведенные в данном пособии, носят справочный характер. За разъяснением трудноусваиваемых вопросов курса необходимо обратиться к лектору или преподавателю-консультанту на кафедру, осуществляющую преподавание физики для данной специальности. В период самопроверки или подготовки к выполнению контрольных работ рекомендуется решение задач из списка предложенных сборников задач по курсу общей физики.

3. Номера задач, которые студент должен включить в свою контрольную работу, определяются по таблице вариантов. Выбор номера варианта осуществляется по последней цифре номера персональной зачетной книжки. В отдельных случаях вариант назначается преподавателем индивидуально.

4. Контрольные работы нужно выполнять черными или синими чернилами в тетради, на обложке которой привести необходимые сведения по следующему образцу:

Студент ***** факультета БНТУ

Ф. И. О.

Шифр специальности ***** Группа *****

Адрес: г. ***** , ул. ***** дом ***, кв. ***

Контрольная работа N *** по физике

5. Условия задач в контрольной работе *необходимо переписывать полностью, без сокращений*. Для замечаний преподавателя и работы над ошибками *оставлять чистой страницу*. Решение каждой задачи *необходимо начинать с новой страницы*.

6. В конце контрольной работы указать, каким учебным пособием студент пользовался при изучении физики и решении задач (название учебника, автор, год издания). Это делается для того, чтобы рецензент в случае необходимости мог выяснить, откуда появилась та или иная формула, используемая при решении задачи, правильность ее понимания студентом или указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы. Табличные значения физических величин, необходимые для решения большинства задач, приведены в конце пособия в приложении. Разрешается также использовать табличные значения величин из другой справочной литературы с обязательной ссылкой на нее при оформлении задачи.

7. Для специальностей, требующих предоставления нескольких контрольных работ в течение семестра, каждую из работ необходимо высылать на рецензию в отдельной тетради. Во избежание повторения одних и тех же ошибок очередную работу желательно высылать только после получения рецензии на предыдущую.

8. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан предоставить ее на повторную рецензию, исправив те задачи, решения которых оказались неверными.

9. Зачтенные контрольные работы предъявляются экзаменатору. Студент должен быть готов во время экзамена дать пояснения по решению задач, входящих в контрольные работы.

10. Решения задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями; в тех случаях, когда это возможно, дать чертеж, выполненный аккуратно, с помощью чертежных принадлежностей.

11. Решать задачу надо в *общем виде*, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

12. После получения расчетной формулы для проверки ее правильности следует подставить в правую часть формулы размерности величин, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученное при этом значение является размерностью искомой величины, т. е. совпадает с размерностью левой части. Если такого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.

13. Числовые значения величин при подстановке их в расчетную формулу следует выражать только в единицах СИ. В виде исключе-

ния допускается выражать в любых, но одинаковых единицах числовые значения величин с одинаковой размерностью, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.

14. При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Это относится и к случаю, когда расчеты проводятся с применением калькуляторов, которые имеют большое количество разрядов. Например, вместо 4630 надо записать $4,63 \cdot 10^3$, вместо 0,00532 записать $5,32 \cdot 10^{-3}$ и т. п.

15. Расчет по формуле надо проводить с соблюдением правил приближенных вычислений (см., например, приложение о приближенных вычислениях в «Задачнике по физике» А. Г. Чертова, А. А. Воробьева).

РАЗДЕЛЫ «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ», «ОПТИКА. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ» РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Рабочая программа предназначена для специальностей инженерно-технического (приборостроительного, машиностроительного) и инженерно-педагогического профиля.

Электромагнетизм

Магнитное поле. Магнитное взаимодействие токов. Закон Ампера. Магнитная индукция. Опыты Эйхенвальда и Иоффе. Закон Био – Савара – Лапласа. Поле прямого и кругового токов. Магнитный момент кругового тока. Циркуляция магнитной индукции. Вихревой характер магнитного поля. Поле соленоида. Поток вектора магнитной индукции. Работа перемещения контура с током в магнитном поле. Магнитное поле движущихся зарядов. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Сила Лоренца. Эффект Холла.

Электромагнитная индукция. Возникновение индукционного тока. Закон Ленца. ЭДС индукции. Закон Фарадея. Вывод ЭДС индукции из закона сохранения энергии. Электронный механизм возникновения ЭДС. Индуктивность. Самоиндукция и взаимоиנדукция. Энергия магнитного поля.

Магнитные свойства вещества. Намагничивание вещества. Напряженность магнитного поля. Циркуляция напряженности магнитного поля. Магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость. Виды магнетиков. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Гистерезис. Спин электрона. Опыты Эйнштейна и де Гааза, Иоффе и Капицы, как доказательство спиновой природы ферромагнетиков. Доменная природа ферромагнетиков. Точка Кюри. Магнитострикция.

Электромагнитные колебания. Понятие о переменном токе. Колебательный разряд конденсатора. Собственные колебания в контуре без активного сопротивления. Контур с омическим сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Затухающие колебания. Вынужденные электрические колебания. Резонанс напряжений и токов.

Электромагнитные волны. Ток смещения. Вихревое электрическое поле. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Скорость распространения электромагнитных волн в средах. Вектор Пойнтинга. Опыты Герца. Открытие радиосвязи А. С. Поповым. Шкала электромагнитных волн.

Оптика

Введение. Предмет оптики и эволюция представлений о природе света.

Геометрическая оптика. Границы применимости геометрической оптики. Понятие оптического луча. Законы геометрической оптики. Центрированная оптическая система. Кардинальные элементы центрированной оптической системы: фокусы, фокальные плоскости, главные плоскости и главные точки, узлы. Формула оптической системы. Диафрагмы. Действующая диафрагма. Входной и выходной зрачок оптической системы. Светосила оптической системы. Тонкая линза. Построение изображений в оптических системах. Лупа, зрительная труба, микроскоп. Глаз и зрение.

Интерференция световых волн. Когерентность. Временная и пространственная когерентность. Способы наблюдения интерференции света. Классические интерференционные опыты: бипризма Френеля, бизеркала Френеля, опыт Юнга, интерференция в тонких пленках, кольца Ньютона. Интерферометры. Многолучевая интерференция. Просветленная оптика и другие практические применения интерференции.

Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля. Дифракция Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля на простейших преградах: круглом отверстии, крае полуплоскости. Спираль Корню. Дифракция Фраунгофера на щели и на системе щелей. Дифракционные решетки. Разновидности дифракционных решеток (амплитудные, фазовые, пропускающие, отражающие). Особенности изготовления дифракционных решеток, реплики. Применение дифракционных решеток.

Фотометрия и термодинамика излучения. Основные фотометрические величины (поток лучистой энергии, сила света, яркость, освещенность). Источники Ламберта. Особенности восприятия излучения человеческим глазом. Фотометрические и светотехнические величины. Функция видности. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа. Энергетическая светимость. Испускательная и поглощательная способность тела. Абсолютно черное тело. Законы излучения абсолютно черного тела (формула Планка, закон Стефана – Больцмана, закон Вина). Оптическая пирометрия. Методы оптического измерения температуры.

Поляризация света. Поляризованный свет. Плоскополяризованный свет. Свет, поляризованный по кругу и эллипсу. Получение поляризованного света. Двойное лучепреломление в кристаллах. Призма Николя. Поляризация света при отражении. Угол Брюстера, закон Брюстера. Оптически активные среды. Вращение плоскости поляризации.

Дисперсия света. Явление дисперсии. Опыты Ньютона. Нормальная и аномальная дисперсии. Электронная теория дисперсии.

Перенос излучения в мутных средах. Классификация мутных сред (дымы, туманы, взвеси, суспензии, мутные твердые тела). Ослабление излучения в мутных средах. Поглощение и рассеяние излучения. Закон Бугера.

Квантовые свойства света. Фотоэффект и уравнение Эйнштейна. Внешний и внутренний фотоэффект. Фотогальванический эффект. Эффект Комптона и импульс фотона. Элементарная теория эффекта Комптона. Давление света. Опыты Лебедева.

Фотохимическое действие света. Фотохимическое действие света. Законы фотохимии. Сенсibilизаторы. Физические основы фотографии. Цветная фотография. Голография. Физические принципы и техническая реализация голографии.

Элементы атомной физики

Строение атома. Опыты Резерфорда. Постулаты Бора. Теория водородного атома. Спектральные серии и уровни энергии. Недостатки теории Бора. Гипотеза де Бройля. Волновая функция. Уравнение Шредингера. Квантование энергии на примере частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры. Свойства лазерного излучения и его применение в технологических процессах. Элементы нелинейной оптики.

Элементы ядерной физики

Атомное ядро. Ядерные реакции. Закон радиоактивного распада. Цепная реакция деления ядер. Ядерные реакторы. Термоядерная реакция синтеза. Проблема источников энергии и возможные пути ее решения.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1977–1979. – Т. 2, 3.
2. Савельев, И. В. Курс физики / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1988. – Т. 2, 3.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 4 т. – М.: КНОРУС, 2012. – Т. 2, 3, 4.
4. Зисман, Г. А. Курс общей физики / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – М.: Наука, 1972–1974. – Т. 2, 3. – Киев: Дніпро, 1994. – Т. 1, 2.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007.
6. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2001.
7. Воробьев, А. А. Задачник по физике / А. А. Воробьев, А. Г. Чертов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2007.
8. Волькенштейн, В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М.: Наука, 1979.
9. Павлова, З. Г. Сборник задач по курсу физики с решениями / З. Г. Павлова, Т. И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 2004.
10. Беликов, Б. С. Решение задач по физике: Общие методы / Б. С. Беликов. – М.: Высшая школа, 1986. – 256 с.

11. Мурзов, В. И. Общая физика в задачах и решениях / В. И. Мурзов. – Мн.: Высшая школа, 1986. – 161 с.
12. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М.: Наука, 1977.
13. Матвеев, А. Н. Электричество. Магнетизм / А. Н. Матвеев. – Высшая школа, 1980.
14. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976.
15. Саржевский, А. М. Оптика / А. М. Саржевский. – Мн.: Издательство Университетское, 1984. – Т. 1, 2.
16. Гольдин, Л. Л. Введение в атомную физику / Л. Л. Гольдин, Г. И. Новикова. – М.: Наука, 1969. – 303 с.
17. Широков, Ю. М. Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. – М.: Наука, 1980.
18. Шпольский, Э. В. Атомная физика / Э. В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 1, 2.
19. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, С. Лейтон. – М.: Мир, 1977. – Вып. 1–4, 7.
20. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Л. А. Сена. – М.: Наука, 1977.
21. Чертов, А. Г. Единицы физических величин / А. Г. Чертов. – М.: Высшая школа, 1977.
22. Детлаф, А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М.: Наука, 1979.
23. Васильчикова, Е. Элементарная физика: справочник / Е. Васильчикова, Н. М. Кошкин. – М.: АО Столетие, 1996.

УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1.1. Основные понятия и формулы

Связь магнитной индукции \mathbf{B}^1 и магнитного поля напряженностью \mathbf{H} :

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

где μ – относительная магнитная проницаемость среды;

μ_0 – магнитная постоянная. В вакууме $\mu = 1$.

Закон Био – Савара – Лапласа:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} [d\mathbf{l} \mathbf{r}] \frac{I}{r^3} \quad \text{или} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin \alpha}{r^2},$$

где $d\mathbf{B}$ – магнитная индукция поля, создаваемая элементом провода длиной $d\mathbf{l}$ с током I ;

\mathbf{r} – радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция;

α – угол между радиусом-вектором и направлением тока в элементе провода $d\mathbf{l}$.

Магнитная индукция в центре кругового тока:

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

где R – радиус кругового витка.

Магнитная индукция на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}},$$

где h – расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

¹ Здесь и далее жирным шрифтом обозначены **векторные** величины.

Магнитная индукция поля прямого тока:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0},$$

где r_0 – расстояние от оси провода до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля соленоида:

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0 nI,$$

где n – отношение числа витков соленоида к его длине.

Для расчета магнитных полей используется также теорема о циркуляции вектора \mathbf{H} (закон полного тока для магнитного поля):

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I_i,$$

где Γ – замкнутый контур, охватывающий токи I_i ;

$\oint_{\Gamma} \mathbf{H} d\mathbf{l}$ – циркуляция вектора \mathbf{H} вдоль контура Γ .

Сила, действующая на провод длиной l с током I в магнитном поле (закон Ампера):

$$\mathbf{F} = I[\mathbf{lB}] \quad \text{или} \quad F = IlB \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением тока в проводе и вектором магнитной индукции \mathbf{B} .

Это выражение справедливо для однородного магнитного поля и прямого отрезка провода. Если поле неоднородно и провод не является прямым, то закон Ампера нужно применять к каждому элементу провода в отдельности в виде:

$$d\mathbf{F} = I[d\mathbf{lB}].$$

Магнитный момент плоского контура с током:

$$\mathbf{p}_m = I\mathbf{S}\mathbf{n},$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали (положительной) к плоскости контура;

I – сила тока, протекающего по контуру;

S – площадь контура.

Механический (вращательный) момент, или момент силы, который действует на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}] \quad \text{или} \quad M = p_m B \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами \mathbf{p}_m и \mathbf{B} .

Потенциальная (механическая) энергия контура с током в магнитном поле:

$$\Pi = -(\mathbf{p}_m \mathbf{B}) \quad \text{или} \quad \Pi = -p_m B \cos \alpha.$$

Отношение магнитного момента \mathbf{p}_m к механическому моменту (моменту импульса) L заряженной частицы, движущейся по крутой орбите:

$$\frac{\mathbf{p}_m}{L} = \frac{q}{2m},$$

где q – заряд частицы;

m – масса частицы.

Сила Лоренца:

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v} \mathbf{B}] \quad \text{или} \quad F = qvB \sin \alpha,$$

где \mathbf{v} – скорость заряженной частицы;

α – угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Если частица находится одновременно в электрическом и магнитном полях, то под силой Лоренца понимают выражение:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \mathbf{B}].$$

Магнитный поток:

а) в случае однородного магнитного поля и плоской поверхности:

$$\Phi = \mathbf{B}S \cos \alpha \quad \text{или} \quad \Phi = B_n S,$$

где S – площадь контура;

α – угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции;

B_n – проекция вектора \mathbf{B} на нормаль n к поверхности контура;

б) в случае неоднородного поля и произвольной поверхности:

$$\Phi = \int_S B_n dS \quad (\text{интегрирование ведется по всей поверхности}).$$

Потокоцепление (полный магнитный поток):

$$\Psi = N\Phi.$$

Эта формула применима к соленоиду и тороиду с равномерно намотанными плотно прилегающими друг к другу витками числом N .

Работа по перемещению замкнутого контура в магнитном поле:

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

где $\Delta\Phi$ – изменение магнитного потока, пронизывающего контур. Если $A > 0$, работа выполняется источником тока, если $A < 0$, работа выполняется внешними силами.

ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Разность потенциалов на концах провода длиной l , движущегося со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле:

$$U = Bl\mathbf{v} \sin \alpha,$$

где l – длина провода;

α – угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R} \quad \text{или} \quad q = N \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{\Delta\Psi}{R},$$

где R – сопротивление контура.

Индуктивность контура:

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

ЭДС самоиндукции:

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

Индуктивность соленоида:

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

где n – отношение числа витков соленоида к его длине;

V – объем соленоида.

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

$$\text{а) } I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) \quad (\text{при замыкании цепи}),$$

где \mathcal{E} – ЭДС источника тока;

t – время, прошедшее после замыкания цепи;

$$\text{б) } I = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (\text{при размыкании цепи}),$$

где I_0 – сила тока в цепи при $t = 0$;

t – время, прошедшее с момента размыкания цепи.

Энергия магнитного поля:

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

Объемная плотность энергии магнитного поля (энергия магнитного поля в единице объема):

$$w = \frac{BH}{2}, \text{ или } w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \text{ или } w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2},$$

где B – магнитная индукция;

H – напряженность магнитного поля.

1.2. Примеры решения задач к разделу 1

Пример 1. Длинный провод с током $I = 50$ А изогнут под углом $\alpha = 2\pi/3$. Определить магнитную индукцию B в точке A (рис. 1). Расстояние $d = 5$ см.

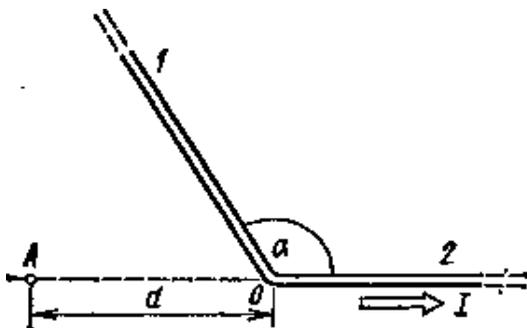


Рис. 1

Решение. Изогнутый провод можно рассматривать как два длинных провода, концы которых соединены в точке O . В соответствии с принципом суперпозиции магнитных полей магнитная индукция B в точке A будет равна сумме магнитных индукций B_1 и B_2 полей,

создаваемых отрезками длинных проводов 1 и 2, т. е. $\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2$. Магнитная индукция \mathbf{B}_2 равна нулю. Это следует из закона Био – Савара – Лапласа, согласно которому в точках, лежащих на оси проводника, $d\mathbf{B} = 0$ (так как $[d\mathbf{l} \mathbf{r}] = 0$).

Магнитную индукцию \mathbf{B}_1 найдем, воспользовавшись формулой:

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

где r_0 – кратчайшее расстояние от проводника 1 до точки A (рис. 2).

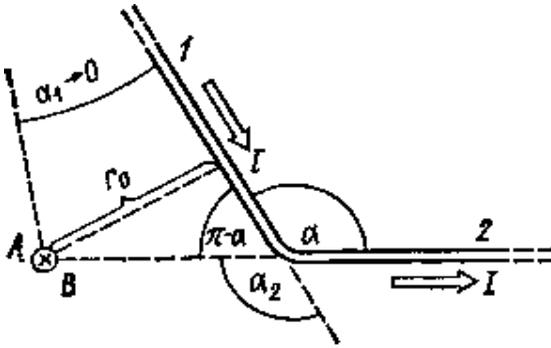


Рис. 2

В нашем случае $\alpha_1 \rightarrow 0$ (проводник длинный), $\alpha_2 = \alpha = 2\pi/3$, тогда $\cos \alpha_2 = \cos(2\pi/3) = -1/2$. Расстояние $r_0 = d \sin(\pi - \alpha) = d \sin(\pi/3) = d\sqrt{3}/2$. Тогда магнитная индукция:

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi d\sqrt{3}/2} \left(1 + \frac{1}{2}\right).$$

Так как $\mathbf{B} = \mathbf{B}_1$ ($\mathbf{B}_2 = 0$), то

$$B = \frac{\mu_0 I\sqrt{3}}{4\pi d}.$$

Вектор \mathbf{B} сонаправлен с вектором \mathbf{B}_1 и определяется правилом правого винта. На рис. 2 это направление отмечено значком \otimes (перпендикулярно плоскости чертежа от нас).

Произведем вычисления:

$$B = \frac{\sqrt{3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{4\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \text{ Тл} = 3,46 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 34,6 \text{ мкТл.}$$

Пример 2. На проволочный виток радиусом $r = 10$ см, помещенный между полюсами магнита, действует максимальный механический момент $M_{\max} = 6,5$ мкН. Сила тока I в витке равна 2 А. Определить магнитную индукцию \mathbf{B} поля между полюсами магнита. Действием магнитного поля Земли пренебречь.

Решение. Индукцию \mathbf{B} магнитного поля можно определить из выражения механического момента, действующего на виток с током в магнитном поле:

$$M = p_m \mathbf{B} \sin \alpha. \quad (1)$$

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

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

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

$$\mathbf{B} = M_{\max} / (\pi r^2 I). \quad (2)$$

Произведя вычисления по формуле (2), найдем: $\mathbf{B} = 104$ мкТл.

Пример 3. Электрон, имея скорость $\mathbf{v} = 2$ Мм/с, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $\mathbf{B} = 30$ мТл под углом $\alpha = 30^\circ$ к направлению линий индукции. Определить радиус R и шаг h винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

Решение. Известно, что на заряженную частицу, влетевшую в магнитное поле, действует сила Лоренца, перпендикулярная векторам магнитной индукции \mathbf{B} и скорости \mathbf{v} частицы:

$$F = Q \mathbf{v} \mathbf{B} \sin \alpha, \quad (1)$$

где Q – заряд частицы.

В случае, если частицей является электрон, формулу (1) можно записать в виде:

$$F = |e| \mathbf{v} \mathbf{B} \sin \alpha.$$

Так как вектор силы Лоренца перпендикулярен вектору скорости, то модуль скорости не будет изменяться под действием этой силы. Но при постоянной скорости, как это следует из формулы (1), останется постоянным и значение силы Лоренца. Из механики известно, что постоянная сила, перпендикулярная скорости, вызывает движение по окружности. Следовательно, электрон, влетевший в магнитное поле, будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, со скоростью, равной поперечной составляющей v_{\perp} скорости (рис. 3); одновременно он будет двигаться и вдоль поля со скоростью v_{\parallel} :

$$v_{\perp} = v \sin \alpha; \quad v_{\parallel} = v \cos \alpha.$$

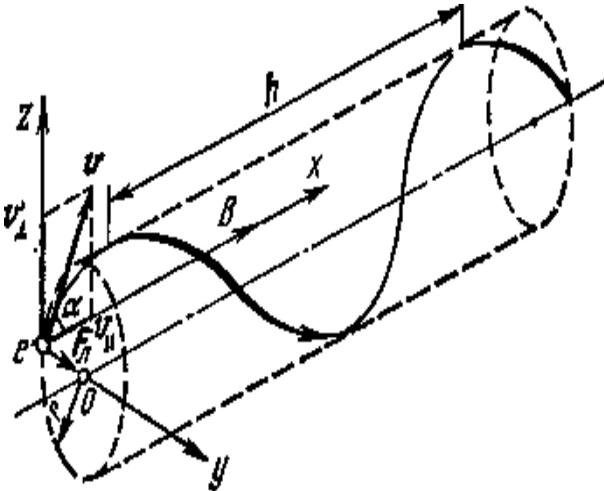


Рис. 3

В результате одновременного участия в движениях по окружности и по прямой электрон будет двигаться по винтовой линии.

Радиус окружности, по которой движется электрон, найдем следующим образом. Сила Лоренца F сообщает электрону нормальное ускорение a_n . По второму закону Ньютона:

$$F = ma_n, \text{ где } F = |e|v_{\perp}B \text{ и } a_n = v^2/R.$$

Тогда

$$|e|v_{\perp}B = mv_{\perp}^2/R,$$

откуда после сокращения на v_{\perp} находим радиус винтовой линии:

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|e|B},$$

или

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{|e|B}.$$

Подставив значения величин m , v , e , B и α и произведя вычисления, получим: $R = 0,19$ мм.

Шаг винтовой линии равен пути, пройденному электроном вдоль поля со скоростью v_{\parallel} за время, которое понадобится электрону для того, чтобы совершить один оборот:

$$h = v_{\parallel}T, \tag{2}$$

где $T = 2\pi R / v_{\perp}$ – период вращения электрона. Подставив это выражение для T в формулу (2), найдем:

$$h = \frac{2\pi R v_{\parallel}}{v_{\perp}},$$

$$h = \frac{2\pi R v \cos \alpha}{v \sin \alpha} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha.$$

Подставив в эту формулу значения величин π , R и α и вычислив, получим: $h = 2,06$ мм.

Пример 4. В одной плоскости с бесконечно длинным прямым проводом, по которому течет ток $I = 50$ А, расположена прямоугольная рамка так, что две большие стороны ее длиной $l = 65$ см параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из этих сторон равно ее ширине. Каков магнитный поток Φ , пронизывающий рамку?

Решение. Магнитный поток Φ через поверхность площадью S определяется выражением:

$$\Phi = \iint B_n dS.$$

В нашем случае вектор магнитной индукции \mathbf{B} перпендикулярен плоскости рамки. Поэтому для всех точек рамки $B_n = B$. Магнитная индукция \mathbf{B} , создаваемая бесконечно длинным прямым проводником с током, определяется формулой:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x},$$

где x – расстояние от провода до точки, в которой определяется B .

Для вычисления магнитного потока заметим, что так как B зависит от x , то и элементарный поток Φ будет также зависеть от x , и тогда $d\Phi = B(x)dS$.

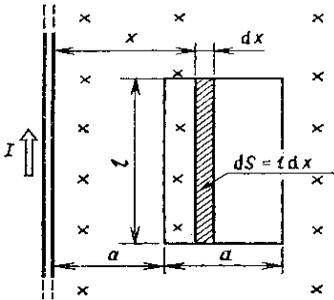


Рис. 4

Разобьем площадь рамки на узкие элементарные площадки длиной l , шириной dx и площадью $dS = l dx$ (рис. 4). В пределах этой площадки магнитную индукцию можно считать постоянной, так как все части площадки равноудалены (на расстояние x) от провода. С учетом сделанных замечаний элементарный магнитный поток можно записать в виде:

$$d\Phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx.$$

Проинтегрировав полученное выражение в пределах от $x_1 = a$ до $x_2 = 2a$, найдем:

$$\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\alpha} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln x \Big|_{\alpha}^{2\alpha} = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} (\ln 2\alpha - \ln \alpha) = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln 2. \quad (1)$$

Убедимся в том, что правая часть полученного равенства дает единицу магнитного потока (Вб): $[\mu_0] [l] [I] = \text{Гн/м} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Вб}$. Произведя вычисления по формуле (1), найдем $\Phi = 4,5 \text{ мкВб}$.

Пример 5. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ равномерно вращается рамка, содержащая $N = 1000$ витков, частота вращения $n = 10 \text{ рад/с}$. Площадь S рамки равна 150 см^2 . Определить мгновенное значение ЭДС \mathcal{E}_i , соответствующее углу поворота рамки на 30° .

Решение. Мгновенное значение ЭДС индукции \mathcal{E}_i определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея – Максвелла:

$$\mathcal{E}_i = -d\Psi / dt. \quad (1)$$

Потокоцепление $\Psi = N\Phi$, где N – число витков, пронизываемых магнитным потоком Φ .

Подставив выражение Ψ в формулу (1), получим:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

При вращении рамки магнитный поток Φ , пронизывающий рамку в момент времени t , изменяется по закону:

$$\Phi = BS \cos \omega t,$$

где B – магнитная индукция;

S – площадь рамки;

ω – угловая частота.

Подставив в формулу (2) выражение Φ и продифференцировав по времени, найдем мгновенное значение ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = NBS\omega \sin \omega t. \quad (3)$$

Угловая частота ω связана с частотой n вращения соотношением $\omega = 2\pi n$. Подставив это выражение в формулу (3) и заменив ωt на угол α , получим:

$$\mathcal{E}_i = 2\pi nBS \sin \alpha. \quad (4)$$

Убедимся в том, что правая часть полученного равенства дает единицу ЭДС (B). Учтя, что 2π , N и $\sin \alpha$ – величины безразмерные и неименованные, получим:

$$[n][B][S] = 1 \text{ с}^{-1} \cdot 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = \frac{1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ с}} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В}.$$

Произведя вычисления по формуле (4), найдем: $\mathcal{E}_i = 47,1 \text{ В}$.

Пример. 6. По соленоиду течет ток $I = 2 \text{ А}$. Магнитный поток Φ , пронизывающий поперечное сечение соленоида, равен 4 мкВб . Определить индуктивность L соленоида, если он имеет $N = 800$ витков.

Решение. Индуктивность L соленоида связана с потокосцеплением Ψ соотношением $\Psi = LI$, откуда $L = \Psi / I$. Заменив здесь потокосцепление Ψ его выражением через магнитный поток Φ и число витков N соленоида ($\Psi = \Phi N$), получим:

$$L = \Phi N / I. \quad (1)$$

Произведя вычисления по формуле (1), получим: $L = 1,6 \text{ мГн}$.

1.3. Контрольные задачи к разделу 1

301. По двум параллельным бесконечно длинным проводам текут в одинаковых направлениях токи силой $I = 100 \text{ А}$. Расстояние между проводами $d = 0,1 \text{ м}$. Определить магнитную индукцию B в точке, находящейся от одного проводника на расстоянии $r_1 = 5 \text{ см}$, от другого – на расстоянии $r_2 = 12 \text{ см}$.

302. Магнитный момент тонкого проводящего кольца $p_m = 5 \text{ А м}^2$. Определить магнитную индукцию \mathbf{B} в центре кольца, если его радиус $r = 0,1 \text{ м}$.

303. По двум скрещенным под прямым углом бесконечно длинным проводам текут токи I и $2I$ ($I = 100 \text{ А}$). Определить магнитную индукцию \mathbf{B} в центре отрезка, перпендикулярного к обоим проводам, если длина его составляет $d = 10 \text{ см}$. Указать направление вектора \mathbf{B} для выбранных направлений тока.

304. По бесконечно длинному прямому проводу течет ток $I = 200 \text{ А}$. Определить расстояние до точки, в которой модуль магнитной индукции \mathbf{B} будет в 3 раза больше, чем модуль магнитной индукции в центре круглого проводника радиусом $0,5 \text{ м}$, по которому течет вдвое больший ток.

305. Точка A удалена от бесконечного прямого тока на расстояние $d = 10 \text{ см}$. Определить магнитную индукцию \mathbf{B} в точке A , если в ней действует дополнительное внешнее поле, направленное параллельно току в проводнике. Отношение модулей магнитной индукции внешнего поля и поля от проводника равно 2, ток в проводнике $I = 25 \text{ А}$.

306. Два круговых витка расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях так, что их центры совпадают. Радиусы витков равны 10 см и 20 см , а токи в них соответственно равны 2 А и 5 А . Найти магнитную индукцию в центре витков. Рассмотреть два случая: 1) направления токов совпадают; 2) направления токов противоположны.

307. В центре кругового проволочного витка создается магнитное поле со значением магнитной индукции B при некоторой разности потенциалов между концами U . Какую надо приложить разность потенциалов, чтобы получить такую же индукцию в центре витка вдвое большего радиуса, изготовленного из такой же проволоки?

308. По двум параллельным прямым тонким бесконечным проводам текут в противоположных направлениях токи, равные 5 А и 10 А . На каком конечном расстоянии от одного из проводов находится точка, в которой магнитная индукция равна нулю, если расстояние между проводами равно 1 м ?

309. По двум бесконечно длинным, прямым параллельным проводам текут в противоположных направлениях одинаковые по величине токи $I = 60 \text{ А}$. Расстояние между проводами $d = 10 \text{ см}$.

Определить магнитную индукцию B в точке, равноудаленной от проводов на расстояние $l = 10$ см.

310. В центре кругового витка магнитная индукция равна B при приложении к концам витка разности потенциалов U . Во сколько раз нужно увеличить разность потенциалов, чтобы получить такое же значение магнитной индукции в центре витка вдвое большего радиуса, сделанного из того же материала?

311. По двум параллельным проводам длиной $l = 30$ м каждый текут одинаковые токи $I = 500$ А. Расстояние d между проводами равно 10 см. Определить силу F взаимодействия проводов.

312. По трем параллельным прямым проводам, находящимся на одинаковом расстоянии $d = 20$ см друг от друга, текут одинаковые токи $I = 400$ А. В двух проводах направления токов совпадают. Вычислить для каждого из проводов отношение силы, действующей на него, к его длине.

313. Обмотка катушки диаметром $d = 10$ см состоит из плотно прилегающих друг к другу витков тонкой проволоки. Определить минимальную длину l_{\min} катушки, при которой магнитная индукция в середине ее отличается от магнитной индукции бесконечного соленоида, содержащего такое же количество витков на единицу длины, не более чем на 0,5 %. Сила тока, протекающего по обмотке, в обоих случаях одинакова.

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

315. Короткая катушка площадью поперечного сечения $S = 250$ см², содержащая $N = 500$ витков провода, по которому течет ток $I = 5$ А, помещена в однородное магнитное поле напряженностью $H = 1000$ А/м. Найти: 1) магнитный момент p_m катушки; 2) вращающий момент M , действующий на катушку, если ось катушки составляет угол $\alpha = 30^\circ$ с линиями поля.

316. Из тонкого провода длиной $l = 20$ см изготовили круглый виток и поместили его в магнитное поле ($B = 10$ мТл) так, что плоскость витка составляет угол 45° с направлением вектора магнитной

индукции. По проводу пропустили ток $I = 50$ А. Определить момент силы, действующей на виток.

317. Шины генератора длиной $l = 4$ м находятся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Найти силу взаимного отталкивания шин при коротком замыкании, если ток короткого замыкания $I_{кз} = 5$ кА.

318. Квадратный контур со стороной $a = 10$ см, по которому течет ток $I = 50$ А, свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 10$ мТл). Определить изменение Π потенциальной энергии контура при повороте вокруг оси, лежащей в плоскости контура, на угол $\alpha = 180^\circ$.

319. Найти магнитный момент тонкого кругового проводника с током, если радиус витка $R = 100$ мм и индукция магнитного поля в его центре $B = 6,0$ мкТл.

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

321. По круговому витку радиусом $R = 5$ см течет ток $I = 20$ А. Виток расположен в однородном магнитном поле ($B = 40$ мТл) так, что нормаль к плоскости контура составляет угол $\alpha = \pi/6$ с вектором B . Определить изменение потенциальной энергии контура Π при его повороте на угол $\beta = \pi/2$ в направлении увеличения угла.

322. По тонкому кольцу радиусом $R = 10$ см равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 50$ нКл/м. Кольцо вращается относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр, с частотой $n = 10$ рад·с⁻¹. Определить магнитный момент p_m , обусловленный вращением кольца.

323. Магнитная индукция в центре кругового витка составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Магнитный момент витка равен 1 А·м². Вычислить силу тока и радиус витка.

324. Стержень длиной $l = 20$ см заряжен равномерно распределенным зарядом с линейной плотностью $\tau = 0,2$ мкКл/м. Стержень вращается с частотой $n = 10$ рад·с⁻¹ относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец. Определить магнитный момент p_m , обусловленный вращением стержня.

325. Протон движется по окружности радиусом $R = 0,5$ см с линейной скоростью $v = 106$ м/с. Определить магнитный момент p_m , создаваемый эквивалентным круговым током.

326. Тонкое кольцо радиусом $R = 10$ см несет равномерно распределенный заряд $q = 80$ нКл. Кольцо вращается с угловой скоростью $\omega = 50$ рад/с относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр. Найти магнитный момент p_m , обусловленный вращением кольца.

327. Заряд $q = 0,1$ мкКл равномерно распределен по стержню длиной $l = 50$ см. Стержень вращается с угловой скоростью $\omega = 20$ рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Найти магнитный момент p_m , обусловленный вращением стержня.

328. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра (протона) по окружности радиусом $R = 53$ пм. Определить магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока.

329. Очень короткая катушка содержит $N = 1000$ витков тонкого провода. Катушка имеет квадратное сечение со стороной $a = 10$ см. Найти магнитный момент катушки при силе тока $I = 0,1$ А.

330. Магнитный момент витка равен $0,2$ Дж/Тл. Определить сопротивление витка, если его диаметр $d = 10$ см, а напряжение между концами витка составляет 1 мВ.

331. По тонкому стержню длиной $l = 40$ см равномерно распределен заряд $q = 60$ нКл. Стержень вращается с частотой $n = 12$ рад·с⁻¹ относительно перпендикулярной ему оси, проходящей через него на расстоянии $a = l/3$ от одного из его концов. Определить магнитный момент p_m , обусловленный вращением стержня.

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

333. Однозарядный ион натрия прошел ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ кВ и влетел перпендикулярно линиям магнитной индукции в однородное поле ($B = 0,5$ Тл). Определить относительную атомную массу A иона, если он описал окружность радиусом $R = 4,37$ см.

334. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов $U = 800$ В и, влетев в однородное магнитное поле $B = 47$ мТл, стал

двигаться по винтовой линии с шагом $h = 6$ см. Определить радиус R винтовой линии.

335. Альфа-частица прошла ускоряющую разность потенциалов $U = 300$ В и, попав в однородное магнитное поле, стала двигаться по винтовой линии радиусом $R = 1$ см и шагом $h = 4$ см. Определить магнитную индукцию B поля.

336. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов $U = 100$ В и, влетев в однородное магнитное поле ($B = 0,1$ Тл), стала двигаться по винтовой линии с шагом $h = 6,5$ см и радиусом $R = 1$ см. Определить отношение заряда частицы к ее массе.

337. Электрон влетел в однородное магнитное поле ($B = 200$ мТл) перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить силу эквивалентного кругового тока $I_{\text{экв}}$, создаваемого движением электрона в магнитном поле.

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

339. Альфа-частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов U , стала двигаться в однородном магнитном поле ($B = 50$ мТл) по винтовой линии с шагом $h = 5$ см и радиусом $R = 1$ см. Определить ускоряющую разность потенциалов, которую прошла альфа-частица.

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

341. Ион влетает в магнитное поле ($B = 0,01$ Тл) и движется по окружности. Определить кинетическую энергию T (в эВ) иона, если магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока равен $1,6 \cdot 10^{-14}$ А·м².

342. Протон влетел в скрещенные под углом $\alpha = 120^\circ$ магнитное ($B = 50$ мТл) и электрическое ($E = 20$ кВ/м) поля. Определить ускорение a протона в начальный момент времени, если его скорость v ($|v| = 4 \cdot 10^5$ м/с) перпендикулярна векторам E и B .

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

344. Альфа-частица влетела в скрещенные под прямым углом магнитное ($B = 5$ мТл) и электрическое ($E = 30$ кВ/м) поля. Определить ускорение a альфа-частицы в начальный момент времени, если ее скорость v ($|v| = 2 \cdot 10^6$ м/с) перпендикулярна векторам \mathbf{B} и \mathbf{E} , причем силы, действующие со стороны этих полей, противоположно направлены.

345. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 1,2$ кВ, попадает в скрещенные под прямым углом однородные магнитное и электрическое поля и движется прямолинейно. Определить напряженность \mathbf{E} электрического поля, если его магнитная индукция \mathbf{B} равна 6 мТл.

346. Однородные магнитное ($B = 2,5$ мТл) и электрическое ($E = 10$ кВ/м) поля скрещены под прямым углом. Электрон, скорость v которого равна $4 \cdot 10^4$ м/с, влетает в эти поля так, что силы, действующие на него с их стороны, одинаково направлены. Определить ускорение a электрона в начальный момент времени.

347. Однозарядный ион лития массой $m = 7$ а. е. м. прошел ускоряющую разность потенциалов $U = 300$ В и влетел в скрещенные под прямым углом однородные магнитное и электрическое поля. Определить магнитную индукцию \mathbf{B} поля, если траектория иона в скрещенных полях прямолинейна. Напряженность \mathbf{E} электрического поля равна 2 кВ/м.

348. Альфа-частица, имеющая скорость $v = 20$ км/с, влетает под углом $\alpha = 30^\circ$ к одинаково направленным магнитному ($B = 1$ мТл) и электрическому ($E = 1$ кВ/м) полям. Определить ускорение a альфа-частицы в начальный момент времени.

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

350. Магнитное ($B = 2$ мТл) и электрическое ($E = 1,6$ кВ/м) поля одинаково направлены. Перпендикулярно векторам \mathbf{B} и \mathbf{E} влетает электрон со скоростью $v = 0,8$ Мм/с. Определить ускорение a электрона в начальный момент времени.

351. В скрещенные под прямым углом однородные магнитное ($H = 1$ МА/м) и электрическое ($E = 50$ кВ/м) поля влетел ион. При

какой скорости v иона (по модулю и направлению) он будет двигаться в скрещенных полях прямолинейно?

352. Плоский контур площадью $S = 20 \text{ см}^2$ находится в однородном магнитном поле ($B = 0,03 \text{ Тл}$). Определить магнитный поток Φ , пронизывающий контур, если его плоскость создает угол $\alpha = 60^\circ$ с направлением линий индукции.

353. Магнитный поток Φ , проходящий сквозь сечение соленоида, равен 50 мкВб . Длина соленоида $l = 50 \text{ см}$. Найти магнитный момент p_m соленоида, если его витки плотно прилегают друг к другу.

354. В средней части соленоида, содержащего $n = 8$ витков/см, помещен круговой виток диаметром $d = 4 \text{ см}$. Плоскость витка расположена под углом $\alpha = 60^\circ$ к оси соленоида. Определить магнитный поток Φ , пронизывающий виток, если по обмотке соленоида течет ток $I = 1 \text{ А}$.

355. На длинный картонный каркас диаметром $d = 5 \text{ см}$ уложена однослойная обмотка (виток к витку) из проволоки диаметром $d = 0,2 \text{ мм}$. Определить магнитный поток Φ , создаваемый таким соленоидом при силе тока $I = 0,5 \text{ А}$.

356. Квадратный контур со стороной $a = 10 \text{ см}$, в котором течет ток $I = 6 \text{ А}$, находится в магнитном поле ($B = 0,8 \text{ Тл}$) под углом $\alpha = 50^\circ$ к линиям индукции. Какую работу A нужно совершить, чтобы при постоянной силе тока в контуре изменить его форму на окружность?

357. Плоский контур с током $I = 5 \text{ А}$ свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 0,4 \text{ Тл}$). Площадь контура $S = 200 \text{ см}^2$. Поддерживая ток неизменным, его повернули относительно оси, лежащей в плоскости контура, на угол $\alpha = 40^\circ$. Определить совершенную при этом работу A .

358. Виток, в котором поддерживается постоянная сила тока $I = 60 \text{ А}$, свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 20 \text{ мТл}$). Диаметр витка $d = 10 \text{ см}$. Какую работу A нужно совершить для того, чтобы повернуть виток относительно оси, совпадающей с диаметром, на угол $\alpha = \pi/3$?

359. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен плоский контур площадью $S = 100 \text{ см}^2$. Поддерживая в контуре постоянную силу тока $I = 50 \text{ А}$, его переместили в область пространства, где поле отсутствует. Определить магнит-

ную индукцию B поля, если при перемещении контура была совершена работа $A = 0,4$ Дж.

360. Плоский контур с площадью $S = 100 \text{ см}^2$ и током $I = 50 \text{ А}$ расположен в однородном магнитном поле ($B = 0,6 \text{ Тл}$) так, что нормаль к контуру перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определить работу, совершаемую силами поля при медленном повороте контура на угол $\alpha = 30^\circ$ вокруг оси, лежащей в плоскости контура.

361. Определить магнитный поток Φ , пронизывающий соленоид, если его длина $l = 50 \text{ см}$ и магнитный момент $p_m = 0,4 \text{ Вб}$.

362. Стальной сердечник тороида, длина l которого по средней линии равна 1 м , имеет вакуумный зазор длиной $l_0 = 4 \text{ мм}$. Обмотка содержит $n = 8$ витков на 1 см . При какой силе тока I индукция B в зазоре будет равна 1 Тл ? Указание: воспользоваться данными, приведенными на рис. 5.

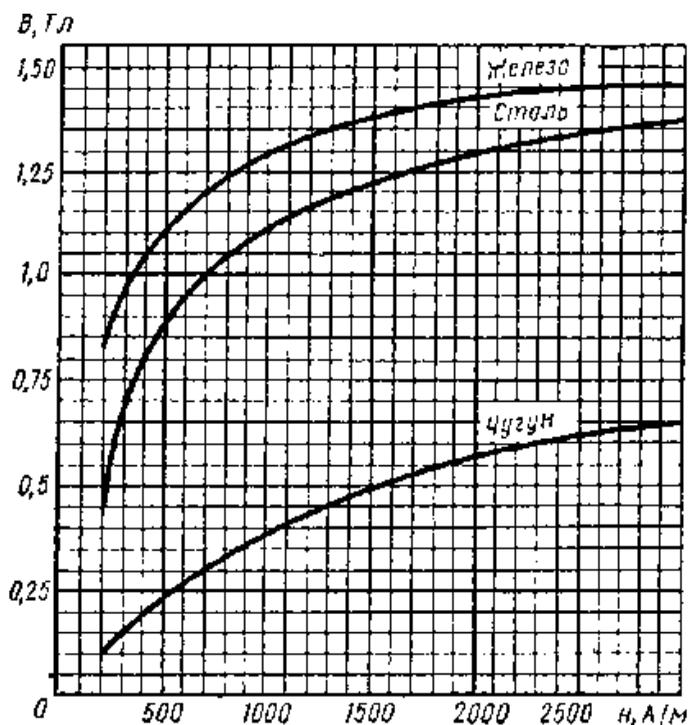


Рис. 5

363. В однородном магнитном поле ($B = 0,1$ Тл) равномерно с частотой $n = 5$ рад·с⁻¹ вращается стержень длиной $l = 50$ см так, что плоскость его вращения перпендикулярна линиям напряженности, а ось вращения проходит через один из его концов. Определить индуцируемую на концах стержня разность потенциалов U .

364. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5$ Тл вращается с частотой $n = 10$ рад·с⁻¹ стержень длиной $l = 20$ см. Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит перпендикулярно через один из концов стержня. Определить разность потенциалов U на концах стержня.

365. В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. При этом по цепи прошел заряд $q = 50$ мкКл. Определить изменение магнитного потока Φ через кольцо; если сопротивление цепи гальванометра $R = 10$ Ом.

366. Тонкий медный провод массой $m = 5$ г согнут в виде замкнутого квадрата. Провод помещен в однородное магнитное поле ($B = 0,2$ Тл) так, что его плоскость перпендикулярна линиям поля. Определить заряд q , который потечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

367. Рамка из провода сопротивлением $R = 0,04$ Ом равномерно вращается в однородном магнитном поле ($B = 0,6$ Тл). Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Площадь рамки $S = 200$ см². Определить заряд q , который потечет по рамке при изменении угла между нормалью к рамке и линиями индукции: 1) от 0 до 45°; 2) от 45 до 90°.

368. Проволочный виток диаметром $D = 5$ см и сопротивлением $R = 0,02$ Ом находится в однородном магнитном поле ($B = 0,3$ Тл). Плоскость витка составляет угол $\alpha = 40^\circ$ с линиями индукции. Какой заряд q протечет по витку при выключении магнитного поля?

369. Рамка, содержащая $N = 200$ витков тонкого провода, может свободно вращаться относительно оси, лежащей в ее плоскости. Площадь рамки $S = 50$ см². Ось рамки перпендикулярна линиям индукции однородного магнитного поля ($B = 0,05$ Тл). Определить максимальную ЭДС \mathcal{E}_{\max} , которая индуцируется в рамке при ее вращении с частотой $n = 40$ с⁻¹.

370. Прямой проводящий стержень длиной $l = 40$ см находится в однородном магнитном поле ($B = 0,1$ Тл). Концы стержня замкну-

ты гибким проводом, находящимся вне поля. Сопротивление всей цепи $R = 0,5$ Ом. Какая мощность P потребуется для равномерного перемещения стержня перпендикулярно линиям магнитной индукции со скоростью $v = 10$ м/с?

371. Проволочный контур площадью $S = 500$ см² и сопротивлением $R = 0,1$ Ом равномерно вращается в однородном магнитном поле ($B = 0,5$ Тл). Ось вращения лежит в плоскости контура и перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определить максимальную мощность P_{\max} , необходимую для вращения контура с угловой скоростью $\omega = 50$ рад/с.

372. Кольцо из медного провода массой $m = 10$ г помещено в однородное магнитное поле ($B = 0,5$ Тл) так, что плоскость кольца составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с линиями магнитной индукции. Определить заряд q , который пройдет по кольцу, если снять магнитное поле.

373. Соленоид сечением $S = 10$ см² содержит $N = 10^3$ витков. При силе тока $I = 5$ А магнитная индукция B поля внутри соленоида равна $0,05$ Тл. Определить индуктивность L соленоида.

374. На картонный каркас длиной $l = 0,8$ м и диаметром $D = 4$ см намотан в один слой провод диаметром $d = 0,25$ мм так, что витки плотно прилегают друг к другу. Вычислить индуктивность L получившегося соленоида.

375. Катушка, намотанная на магнитный цилиндрический каркас, имеет $N = 250$ витков и индуктивность $L_1 = 36$ мГн. Чтобы увеличить индуктивность катушки до $L_2 = 100$ мГн, обмотку катушки сняли и заменили обмоткой из более тонкой проволоки с таким расчетом, чтобы длина катушки осталась прежней. Сколько витков оказалось в катушке после перемотки?

376. Соленоид содержит $N = 4000$ витков провода, по которому течет ток $I = 20$ А. Определить магнитный поток Φ и потокосцепление Ψ , если индуктивность $L = 0,4$ Гн.

377. Индуктивность L соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас, равна $0,5$ мГн. Длина l соленоида равна $0,6$ м, диаметр $D = 2$ см. Определить отношение n числа витков соленоида к его длине.

378. Соленоид содержит $N = 800$ витков. Сечение сердечника (из немагнитного материала) $S = 10$ см². По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B = 8$ мТл. Определить среднее значение

ЭДС самоиндукции $\langle \mathcal{E}_s \rangle$, которая возникает на зажимах соленоида, если сила тока уменьшается практически до нуля за время $t = 0,8$ мс.

379. По обмотке соленоида индуктивностью $L = 0,2$ Гн течет ток $I = 10$ А. Определить энергию W магнитного поля соленоида. Чему равна индуктивность соленоида, у которого энергия поля больше в 4 раза при токе I , равном 5 А?

380. На железное кольцо намотано в один слой $N = 200$ витков. Определить энергию W магнитного поля, если при токе $I = 2,5$ А магнитный поток Φ в железе равен 0,5 мВб.

381. Определить частоту ω_L ларморовой прецессии электронной орбиты в атоме, находящемся в магнитном поле Земли ($B = 50$ мкТл).

382. Магнитная восприимчивость χ марганца равна $1,21 \cdot 10^{-4}$. Вычислить намагниченность J , удельную намагниченность $J_{уд}$ и молярную намагниченность J_m марганца в магнитном поле напряженностью $H = 100$ кА/м (плотность $\rho = 7,4 \cdot 10^3$ кг/м³, молярная масса $M = 54,94 \cdot 10^{-3}$ кг/моль).

383. На один атом железа в незаполненной $3d$ -оболочке приходится четыре неспаренных электрона. Определить теоретическое значение намагниченности $J_{нас}$ железа при насыщении.

384. При индукции B поля, равной 1 Тл, плотность энергии магнитного поля в железе равна 200 Дж/м³. Определить относительную магнитную проницаемость μ железа в этих условиях.

385. При какой напряженности электрического поля в вакууме плотность энергии этого поля будет такой же, как и у магнитного поля с индукцией 1 Тл?

386. Колебательный контур имеет индуктивность $L = 1,6$ мГн, электроемкость $C = 0,04$ мкФ и максимальное напряжение U_{max} на зажимах, равное 200 В. Определить максимальную силу тока I_{max} в контуре. Сопротивление контура ничтожно мало.

387. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 20$ мкГн и конденсатора электроемкостью $C = 80$ нФ. Величина емкости может отклоняться от указанного значения на 2 %. Вычислить, в каких пределах может изменяться длина волны, на которую резонирует контур.

388. Конденсатор электроемкостью $C = 500$ пФ соединен параллельно с катушкой длиной $l = 40$ см и площадью S сечения, равной

5 см^2 . Катушка содержит $N = 1000$ витков. Сердечник немагнитный. Найти период T колебаний.

389. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 2,22 \text{ нФ}$ и катушки из медной ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) проволоки диаметром $d = 0,5 \text{ мм}$. Длина катушки $l = 20 \text{ см}$. Найти логарифмический декремент затухания колебаний.

390. Заряженный конденсатор емкостью $C = 1,2 \text{ нФ}$ замыкается на сопротивление R . Минимальное сопротивление, при котором наблюдается апериодический разряд конденсатора, равно 100 Ом . Определить величину индуктивности L соединительных проводов.

391. Добротность колебательного контура равна 2000 , а частота затухающих колебаний -550 кГц . За какое время сила тока в контуре уменьшится в 16 раз?

392. В электрической цепи, содержащей резистор сопротивлением $R = 20 \text{ Ом}$ и катушку индуктивностью $L = 0,06 \text{ Гн}$, течет ток $I = 20 \text{ А}$. Определить силу тока I в цепи через $t = 0,2 \text{ мс}$ после ее размыкания.

393. К источнику переменного тока, эффективное значение напряжения которого $U = 220 \text{ В}$ и частота 50 Гц , присоединены последовательно конденсатор емкостью $C = 35,4 \text{ мкФ}$, катушка с индуктивностью $L = 0,7 \text{ Гн}$ и резистор $R = 100 \text{ Ом}$. Определить эффективные величины силы тока в цепи и напряжения на всех трех элементах цепи, а также угол сдвига фаз между током и напряжением источника.

394. Получите формулу для полного сопротивления цепи Z и сдвига фаз между напряжением и током при параллельном соединении активного сопротивления R , емкости C и индуктивности L .

395. Электромагнитная волна распространяется в вакууме вдоль оси x . В некоторый момент времени в точке A модуль плотности тока смещения равен $j_{\text{см}} = 160 \text{ мкА/м}^2$. Определить в данной точке в тот же момент времени модуль производной dE/dx .

396. В однородной и изотропной среде с $\epsilon = 3,00$ и $\mu = 1,00$ распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны $E_m = 1,00 \text{ В/м}$. Найти амплитуду напряженности магнитного поля волны H_m и фазовую скорость волны v .

397. В некоторой среде распространяется электромагнитная волна частоты ω . Диэлектрическая проницаемость среды при этой час-

тоте $\varepsilon = 3,00$, а магнитная проницаемость $\mu = 1,00$. Найти вектор Пойнтинга \mathbf{S} в той точке, в которой электрический вектор изменяется по закону $\mathbf{E} = 10,0 \cos(\omega t + \alpha)\mathbf{e}_z$ (В/м). Вектор \mathbf{H} колеблется вдоль оси x .

398. Два параллельных провода, погруженных в глицерин, индуктивно соединены с генератором электромагнитных колебаний частотой $\nu = 420$ МГц. Расстояние l между пучностями стоячих волн на проводах равно 7 см. Найти диэлектрическую проницаемость ε глицерина. Магнитную проницаемость μ принять за единицу.

399. Электромагнитная волна частоты 3 МГц переходит из вакуума в диэлектрик, для которого $\varepsilon = 4$. Найти изменение ее длины волны.

400. Плоская электромагнитная волна падает нормально на поверхность плоскопараллельного слоя диэлектрика толщиной $l = 2$ мм. Диэлектрическая проницаемость слоя уменьшается экспоненциально от $\varepsilon_1 = 4$ на передней поверхности до $\varepsilon_2 = 2$ на задней. Относительная магнитная проницаемость равна 1. Определить время распространения заданной фазы волны через слой.

2. ОПТИКА. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

2.1. Основные понятия и формулы

Фокусное расстояние сферического зеркала:

$$F = \frac{R}{2},$$

где R – радиус кривизны сферического зеркала.

Формула сферического зеркала:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b},$$

где a и b – расстояния от полюса зеркала до предмета и изображения соответственно.

Если изображение мнимое, величина b берется со знаком минус.

Если фокус сферического зеркала мнимый (зеркало выпуклое), то величина F берется со знаком минус.

Закон преломления света (рис. 6):

$$\frac{\sin \varepsilon_1}{\sin \varepsilon_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

где ε_1 – угол падения;

ε_2 – угол преломления;

$n_{21} = n_2 / n_1$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой;

n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй сред соответственно.

Предельный угол полного отражения при переходе света из среды более оптически плотной (n_1) в среду менее оптически плотную (n_2):

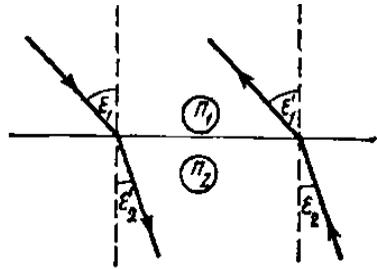


Рис. 6

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1},$$

где $n_2 < n_1$.

Оптическая сила тонкой линзы:

$$D = \frac{1}{F} = \left(\frac{n}{n_0} - 1\right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$

где n – абсолютный показатель преломления материала линзы;

n_0 – абсолютный показатель преломления среды, одинаковой с обеих сторон линзы.

В приведенной формуле радиусы выпуклых поверхностей (R_1 и R_2) берутся со знаком плюс, вогнутых – со знаком минус.

Оптическая сила двух тонких сложенных вплотную линз:

$$D = D_1 + D_2.$$

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где d – расстояние от оптического центра линзы до предмета;

f – расстояние от оптического центра линзы до изображения, которое создается.

Если фокус мнимый (линза рассеивающая), то величина f отрицательна.

Угловое увеличение лупы:

$$\Gamma = \frac{d_0}{F},$$

где d_0 – расстояние наилучшего зрения ($d_0 = 25$ см).

Угловое увеличение телескопа:

$$\Gamma = \frac{F_1}{F_2},$$

где F_1 и F_2 – фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно.

Угловое увеличение микроскопа:

$$\Gamma = \frac{\Delta d_0}{F_1 F_2},$$

где Δ – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра (длина тубуса).

Скорость света в среде:

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

где c – скорость света в вакууме;

n – показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны:

$$L = n l,$$

где l – геометрическая длина пути световой волны в среде с показателем преломления n .

Оптическая разность хода двух световых волн:

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

Зависимость разности фаз от оптической разности хода световых волн:

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

где λ – длина световой волны.

Условие усиления света при интерференции:

$$\Delta = \pm k \lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок максимума.

Условие ослабления света:

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

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от тонкой пленки:

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \pm \frac{\lambda}{2}$$

или

$$\Delta = 2dn \cos i_2 \pm \frac{\lambda}{2},$$

где d – толщина пленки;

n – показатель преломления пленки;

i_1 – угол падения;

i_2 – угол преломления света в пленке.

Расстояние между двумя интерференционными полосами на экране, расположенном параллельно двум когерентным источникам света:

$$\Delta y = \frac{d}{L} \lambda,$$

где L – расстояние от источников света до экрана;

d – расстояние между источниками ($d \ll L$).

Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете:

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

где k – номер кольца ($k = 1, 2, 3, \dots$);

R – радиус кривизны линзы.

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете:

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

Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции на одной узкой щели, определяется из условия:

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

где k – порядковый номер максимума ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$);

a – ширина щели.

Угол φ отклонения лучей, соответствующий минимуму (светлая полоса) при дифракции на узкой щели, определяется из условия:

$$a \sin \varphi = k \lambda,$$

где k – порядковый номер минимума ($k = 1, 2, 3, \dots$);

a – ширина щели.

Угол φ отклонения лучей, соответствующий главному максимуму (светлая полоса) при дифракции света на дифракционной решетке, определяется из условия:

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda,$$

где d – период дифракционной решетки;

k – порядковый номер максимума (порядок спектра; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Радиус внешней границы m -й зоны Френеля:

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

где a – расстояние от источника света до волновой поверхности;

b – расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения.

Разрешающая способность дифракционной решетки:

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

где $\Delta\lambda$ – наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \Delta\lambda$), при которой эти линии могут быть видны раздельно в спектре;

N – полное число щелей решетки.

Угловая дисперсия дифракционной решетки:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}.$$

Линейная дисперсия дифракционной решетки:

$$D_{\text{лин}} = F \frac{d\varphi}{d\lambda} = FD,$$

где F – фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран.

Формула Вульфа – Брэгга:

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

где θ – угол скольжения (угол между направлением параллельного пучка рентгеновского излучения, падающего на кристалл, и атомной плоскостью в кристалле);

d – расстояние между атомными плоскостями кристалла.

Разрешающая способность (разрешающая сила) объектива:

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

где $d\psi$ – наименьшее угловое расстояние между двумя точками, при котором они еще различаются оптическим прибором;

D – диаметр объектива.

Закон Брюстера:

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

где ε_B – угол падения, при котором отразившийся от диэлектрика луч полностью поляризован;

n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Закон Малюса:

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

где I_0 – интенсивность плоско поляризованного света, падающего на анализатор;

I – интенсивность этого света после анализатора;

α – угол между направлением колебаний электрического вектора света, падающего на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора (если колебания электрического вектора падающего света совпадают с этой плоскостью, то анализатор пропускает данный свет без ослабления).

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

$$\text{а) } \varphi = \alpha d \quad (\text{в твердых телах}),$$

где α – постоянная вращения;

d – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;

$$\text{б) } \varphi = [\alpha] \rho d \quad (\text{в растворах}),$$

где $[\alpha]$ – удельное вращение;

ρ – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Релятивистская масса:

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

где m_0 – масса покоя частицы;

v – ее скорость;

c – скорость света в вакууме;

β – скорость частицы, выраженная в долях скорости света
($\beta = v / c$).

Взаимосвязь массы и энергии релятивистской частицы:

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

где $E_0 = m_0 c^2$ – энергия покоя частицы.

Полная энергия свободной частицы:

$$E = E_0 + T,$$

где T – кинетическая энергия релятивистской частицы.

Кинетическая энергия релятивистской частицы:

$$T = (m - m_0)c^2 = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (\beta)^2}} - 1 \right).$$

Импульс релятивистской частицы:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = m_0 c \frac{\beta}{\sqrt{1 - (\beta)^2}}.$$

Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы:

$$E^2 = E_0^2 + (pc)^2.$$

Закон Стефана – Больцмана:

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

где R_e – энергетическая светимость абсолютно черного тела;

σ – постоянная Стефана – Больцмана;

T – термодинамическая температура Кельвина.

Если тело не является абсолютно черным, то закон Стефана – Больцмана применяют в виде:

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

где a – коэффициент (степень) черноты тела ($a < 1$).

Закон смещения Вина:

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

где λ_m – длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости;

b – постоянная Вина.

Максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = C_1 T^5,$$

где $C_1 = 1,29 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³ · К⁵).

Энергия фотона:

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega,$$

где h – постоянная Планка;

\hbar – постоянная Планка, деленная на 2π ;

ν – частота фотона;

ω – циклическая частота.

Масса фотона:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{c\lambda},$$

где c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны фотона.

Импульс фотона:

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

Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

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

где $h\nu$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла;

A – работа выхода электрона;

T_{\max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где ν_0 – минимальная частота света, при которой еще возможен фотоэффект;

λ_0 – максимальная длина волны света, при которой еще возможен фотоэффект;

h – постоянная Планка;

c – скорость света в вакууме.

Формула Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = 2\frac{h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где λ_1 – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабосвязанным электроном;

λ_2 – длина волны фотона, рассеянного на угол θ после столкновения с электроном;

m_0 – масса покоящегося электрона.

Комптоновская длина волны:

$$\Lambda = \frac{h}{m_0c}.$$

Давление света при нормальном падении на поверхность:

$$P = \frac{E_e(1 + \rho)}{c} = w(1 + \rho),$$

где E_e – энергетическая освещенность;

w – объемная плотность энергии излучения;

ρ – коэффициент отражения.

Момент импульса электрона согласно теории Бора для атома водорода:

$$L_n = m v_n r_n = \hbar n,$$

где m – масса электрона;

v_n – скорость электрона на n -й орбите;

r_n – радиус n -й стационарной орбиты;

$\hbar = h / 2\pi$ – постоянная Планка;

n – главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Радиус n -й стационарной орбиты:

$$r_n = a_0 n^2,$$

где a_0 – первый боровский радиус.

Энергия электрона в атоме водорода:

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

где E_i – энергия ионизации атома водорода.

Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода:

$$\varepsilon = \hbar\omega = E_{n_2} - E_{n_1} = E_i \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где n_1 и n_2 – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона в атоме.

Спектроскопическое волновое число:

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где λ – длина волны, излучаемая или поглощаемая атомом;

R – постоянная Ридберга.

Длина волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p},$$

где p – импульс частицы.

Импульс частицы и его связь с кинетической энергией T :

$$\text{а) } p = m_0 v = \sqrt{2m_0 T},$$

при $v \ll c$ (нерелятивистский случай);

$$\text{б) } p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + T)T},$$

где m_0 – масса покоя частицы;

m – релятивистская масса;

v – скорость частицы;

c – скорость света в вакууме;

при $v \sim c$ (релятивистский случай);

E_0 – энергия покоя частицы ($E_0 = m_0 c^2$).

Соотношение неопределенностей:

$$\text{а) } \Delta p_x \Delta x \geq \hbar \quad (\text{для координаты и импульса}),$$

где Δp_x – неопределенность проекции импульса на ось X ;

Δx – неопределенность координаты;

б) $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ (для энергии и времени),

где ΔE – неопределенность энергии;

Δt – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний:

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

где $\psi = \psi(x)$ – волновая функция, описывающая состояние частицы;

m – масса частицы;

E – полная энергия;

$U = U(x)$ – потенциальная энергия частицы.

Плотность вероятности:

$$\frac{dw(x)}{dx} = |\Psi(x)|^2,$$

где $dw(x)$ – вероятность того, что частица может быть обнаружена вблизи точки с координатой x на участке dx .

Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2 :

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

Решение уравнения Шредингера для одномерного, бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика:

а) собственная нормированная волновая функция:

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x;$$

б) собственное значение энергии:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2},$$

где n – квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$);

l – ширина ящика.

В области $0 < x < l$ $U = \infty$ и $\psi(x) = 0$.

Массовое число ядра (число нуклонов в ядре):

$$A = Z + N,$$

где Z – зарядовое число (число протонов);

N – число нейтронов.

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 ;

N – число ядер, нераспавшихся к моменту времени t ;

N_0 – число ядер в начальный момент ($t_0 = 0$);

λ – постоянная радиоактивного распада.

Число ядер, распавшихся за время t :

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

В случае, если интервал времени Δt , за который определяется число распавшихся ядер, намного меньше периода полураспада $T_{1/2}$, то число распавшихся ядер можно определить по формуле:

$$\Delta N = N_0 \lambda \Delta t.$$

Зависимость периода полураспада от постоянной радиоактивного распада:

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

Среднее время τ жизни радиоактивного ядра, т. е. интервал времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз:

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

Число атомов N , содержащихся в радиоактивном изотопе:

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

где m – масса изотопа;

μ – молярная масса;

N_A – постоянная Авогадро.

Активность A радиоактивного изотопа:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где dN – число ядер, распадающихся за интервал времени dt ;

A_0 – активность изотопа в начальный момент времени.

Удельная активность изотопа:

$$a = \frac{A}{m}.$$

Дефект массы ядра:

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

где Z – зарядовое число (число протонов в ядре);

A – массовое число (число нуклонов в ядре);

$(A - Z)$ – число нейтронов в ядре;

m_p – масса протона;

m_n – масса нейтрона;

$m_{\text{ядр}}$ – масса ядра.

Энергия связи ядра:

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2,$$

где Δm – дефект массы ядра;

c – скорость света в вакууме.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра равна

$$E_{\text{св}} = 931 \Delta m,$$

где Δm – дефект массы, а. е. м.;

931 – коэффициент пропорциональности (1 а. е. м. \sim 931 МэВ).

Изменение энергии при ядерной реакции определяется по следующей формуле:

$$\Delta W = (\sum M_1 - \sum M_2) c^2,$$

где $\sum M_1$ – сумма масс частиц до реакции и $\sum M_2$ – сумма масс частиц после реакции. Если $\sum M_1 > \sum M_2$, то реакция идет с излучением энергии, если же $\sum M_1 < \sum M_2$, то реакция идет с поглощением энергии. Отметим, что в последнюю формулу так же, как и при вычислении энергии связи ядра, мы можем подставлять массу изотопов, а не ядер, так как поправки на массу электронов оболочки входят с разными знаками и взаимоисключаются.

2.2. Примеры решения задач к разделу 2

Пример 1. На стеклянную призму с преломляющим углом $\theta = 50^\circ$ падает под углом $\varepsilon = 30^\circ$ луч света. Определить угол отклонения σ луча призмой, если показатель преломления n стекла равен 1,56.

Решение. Данную задачу целесообразно решать не в общем виде, как принято, а пооперационно, производя все промежуточные вычисления. В этом случае мы несколько проигрываем в точности расчетов, но выигрываем в наглядности и простоте вычислений. Из рис. 7 видно, что угол отклонения

$$\sigma = \gamma + \gamma'. \quad (1)$$

Углы γ и γ' просто выражаются через углы $\varepsilon_1, \varepsilon'_2, \varepsilon'_1, \varepsilon_2$, которые будем последовательно вычислять:

1) из закона преломления $n = \sin \varepsilon_1 / \sin \varepsilon'_2$ имеем:

$$\varepsilon'_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \varepsilon_1}{n}\right) = 18,7^\circ.$$

2) из рис. 7 следует, что угол падения ε_2 на вторую грань призмы равен:

$$\varepsilon_2 = \theta - \varepsilon'_2 = 31,3^\circ.$$

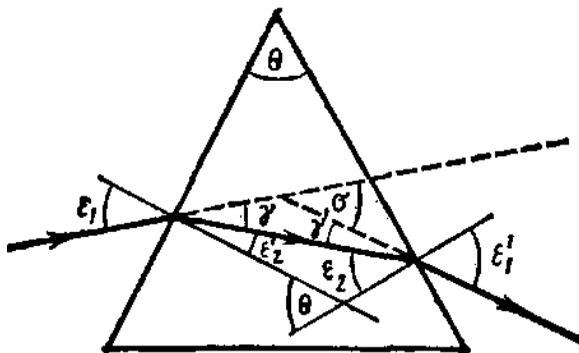


Рис. 7

Угол ε_2 меньше предельного $\varepsilon_{2\text{пред}} = \arcsin(1/n) = 39,9^\circ$, поэтому на второй грани луч преломится и выйдет из призмы;

3) так как

$$\frac{\sin \varepsilon_2}{\sin \varepsilon_1} = \frac{1}{n},$$

то $\varepsilon'_1 = \arcsin(n \sin \varepsilon_2)$; $\varepsilon'_1 = 54,1^\circ$.

Теперь найдем углы γ и γ' :

$$\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon'_2 = 11,3^\circ;$$

и

$$\gamma' = \varepsilon'_1 - \varepsilon_2 = 22,8^\circ.$$

По формуле (1) находим $\sigma = \gamma + \gamma' = 34,1^\circ$.

Пример 2. Оптическая система представляет собой тонкую плосковыпуклую стеклянную линзу (выпуклая поверхность посеребрена). Определить главное фокусное расстояние f системы, если радиус кривизны R сферической поверхности линзы равен 60 см.

Решение. Пусть на линзу падает параксиальный луч KL , параллельный главной оптической оси MN линзы (рис. 8). Так как луч KL перпендикулярен плоской поверхности линзы, то он проходит ее без преломления.

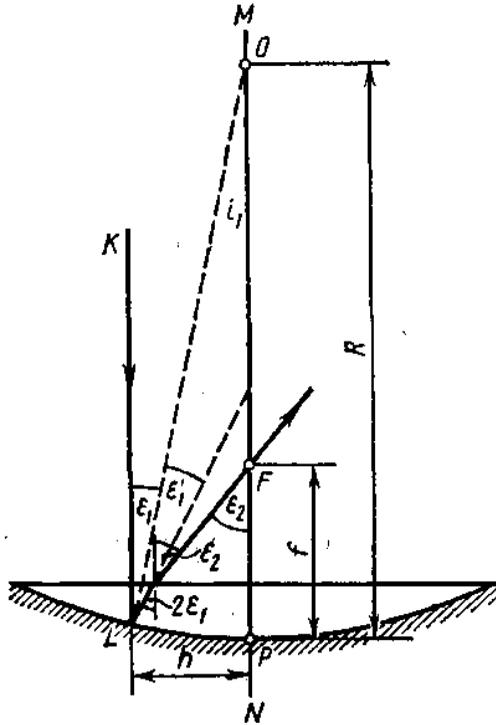


Рис. 8

На сферическую посеребренную поверхность луч падает в точке L под углом ϵ_1 и отражается от нее под углом $\epsilon'_1 = \epsilon_1$. Отраженный луч падает на границу плоской поверхности линзы под углом $2\epsilon_1$ и по выходе из линзы пересекает главную оптическую ось в точке F , образуя с ней угол ϵ_2 . Длина полученного при этом отрезка FP равна искомому фокусному расстоянию оптической системы.

Если учесть, что в силу параксиальности луча KL углы ϵ_1 и ϵ_2 малы, а их синусы и тангенсы практически равны самим углам, выраженным в радианах, то из рис. 8 следует:

$$f = \frac{h}{\varepsilon_2} = \frac{R\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = R \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (1)$$

Входящее в формулу (1) отношение углов $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ найдем, пользуясь законом преломления света, который в нашем случае записывается в виде $2\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 1 / n$, откуда $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 1 / (2n)$.

Подставив это отношение углов в формулу (1), найдем:

$$F = R / (2n). \quad (2)$$

Такой же результат можно получить и из формальных соображений. Так как луч KL последовательно проходит линзу, отражается от вогнутого зеркала и еще раз проходит линзу, то данную оптическую систему можно рассматривать как центрированную систему, состоящую из сложенных вплотную двух плосковыпуклых линз и сферического зеркала. Фокусное расстояние оптической системы может быть найдено по формуле:

$$f = \frac{1}{\Phi},$$

где Φ – оптическая сила системы.

Как известно, оптическая сила системы равна алгебраической сумме оптических сил отдельных компонентов системы. В нашем случае:

$$\Phi = (n-1)\frac{1}{R} + \frac{2}{R} + (n-1)\frac{1}{R} = \frac{2n}{R},$$

т. е.

$$f = \frac{1}{\Phi} = \frac{2}{2n},$$

что совпадает с результатом, выраженным формулой (2).

Пример 3. На толстую стеклянную пластинку, покрытую очень тонкой пленкой, показатель преломления n_2 вещества которой равен 1,4, падает нормально параллельный пучок монохроматического

света ($\lambda = 0,6$ мкм). Отраженный свет максимально ослаблен вследствие интерференции. Определить толщину d пленки.

Решение. Из световой волны, падающей на пленку, выделим узкий пучок SA . Ход этого пучка в случае, когда угол падения $\epsilon_1 \neq 0$, показан на рис. 9. В точках A и B падающий пучок частично отражается и частично преломляется. Отраженные пучки света AS_1 и BCS_1 падают на собирающую линзу L , пересекаются в ее фокусе F и интерферируют между собой.

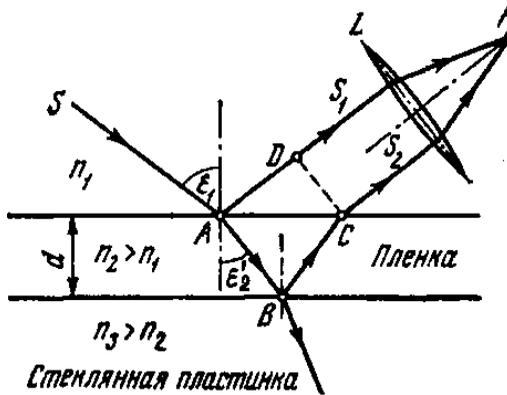


Рис. 9

Так как показатель преломления воздуха ($n_1 = 1,00029$) меньше показателя преломления вещества пленки ($n_2 = 1,4$), который, в свою очередь, меньше показателя преломления стекла ($n_3 = 1,5$), в обоих случаях отражение происходит от среды оптически более плотной, чем та среда, в которой идет падающая волна.

Поэтому фаза колебания пучка света AS_1 при отражении в точке A изменяется на π рад и точно так же на π рад изменяется фаза колебаний пучка света BCS_1 при отражении в точке B . Следовательно, результат интерференции этих пучков света при пересечении в фокусе F линзы будет такой же, как если бы никакого изменения фазы колебаний ни у того, ни у другого пучка не было.

Как известно, условие максимального ослабления света при интерференции в тонких пленках состоит в том, что оптическая разность хода Δ интерферирующих волн должна быть равна нечетному числу полуолн: $\Delta = (2k + 1) (\lambda / 2)$.

Как видно из рис. 9, оптическая разность хода:

$$\Delta = l_2 n_2 - l_1 n_1 = (|AB| + |BC|) n_2 - |AD| n_1.$$

Следовательно, условие минимума интенсивности света примет вид:

$$(|AB| + |BC|) n_2 - |AD| n_1 = (2k + 1)(\lambda / 2).$$

Если угол падения ε_1 будет уменьшаться, стремясь к нулю, то $AD \rightarrow 0$ и $(|AB| + |BC|) \rightarrow 2d$, где d – толщина пленки. В пределе при $\varepsilon_1 = 0$ будем иметь:

$$\Delta = 2dn_2 = (2k + 1)(\lambda / 2),$$

откуда искомая толщина пленки:

$$d = \frac{(2k + 1)\lambda}{4n}.$$

Полагая $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, получим ряд возможных значений толщины пленки:

$$d_0 = \frac{\lambda}{4n_2} = 0,11 \text{ мкм}; \quad d_1 = \frac{3\lambda}{4n_2} = 0,33 \text{ мкм}$$

и т. д.

Пример 4. На стеклянный клин нормально к его грани падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. В возникшей при этом интерференционной картине на отрезке длиной $l = 1$ см наблюдается 10 полос. Определить преломляющий угол θ клина.

Решение. Параллельный пучок света, падая нормально к грани клина, отражается как от верхней, так и от нижней грани. Эти пучки когерентны, и поэтому наблюдается устойчивая картина интерференции. Так как интерференционные полосы наблюдаются при малых углах клина, то отраженные пучки света 1 и 2 (рис. 10) будут практически параллельны.

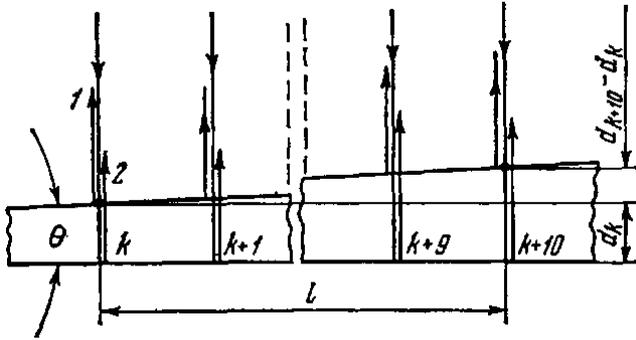


Рис. 10

Темные полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода кратна нечетному числу половины длины волны:

$$\Delta = (2k + 1) (\lambda / 2), \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

Разность хода Δ двух волн складывается из разности оптических длин путей этих волн $2dn \cos \varepsilon'_2$ и половины длины волны $(\lambda / 2)$. Здесь ε'_2 – угол преломления, n – показатель преломления стекла ($n = 1,5$), d – толщина клина в том месте, где луч проходит внутри стекла.

Величина $\lambda / 2$ представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении волны от оптически более плотной среды. Подставляя в формулу (1) значение разности хода Δ , получим:

$$2d_k n \cos \varepsilon'_2 + \lambda / 2 = (2k + 1)(\lambda / 2), \quad (2)$$

где d_k – толщина клина в том месте, где наблюдается темная полоса, соответствующая номеру k .

Согласно условию, угол падения равен нулю, следовательно, и угол преломления ε'_2 равен нулю, а $\cos \varepsilon'_2 = 1$. Раскрыв скобки в правой части равенства (2), после упрощения получим:

$$2d_k n = k\lambda. \quad (3)$$

Пусть произвольной темной полосе номера k соответствует определенная толщина клина в этом месте d_k , а темной полосе номера $k + 1$ соответствует толщина клина d_{k+1} . Согласно условию задачи, 10 полос укладываются на отрезке длиной $l = 1$ см. Тогда искомый угол (рис. 10) будет равен

$$\theta = (d_{k+1} - d_k) / l, \quad (4)$$

где из-за малости преломляющего угла $\sin \theta = \theta$ (угол θ выражен в радианах).

Вычисляем d_k и d_{k+1} из формулы (3), подставляем их в формулу (4) и производим преобразования. В итоге получаем:

$$\theta = 5\lambda / (nl).$$

После вычисления: $\theta = 2 \cdot 10^{-4}$ рад.

Выразим θ в градусах. Для этого воспользуемся соотношением между радианом и секундой $1 \text{ рад} = 2,06'' \cdot 10^5$, т. е.

$$\theta = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 2,06'' \cdot 10^5 = 41,2''.$$

Искомый угол равен $41,2''$.

Пример 5. Нормально к поверхности дифракционной решетки падает параллельный пучок света с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм. Помещенная вблизи решетки линза проецирует дифракционную картину на плоский экран, удаленный от линзы на $L = 1$ м. Расстояние l между двумя максимумами интенсивности первого порядка, наблюдаемыми на экране, равно $20,2$ см (рис. 11). Определить: 1) постоянную d дифракционной решетки; 2) число n штрихов на 1 см; 3) число максимумов, которое при этом дает дифракционная решетка; 4) максимальный угол φ_{\max} отклонения лучей, соответствующих последнему дифракционному максимуму.

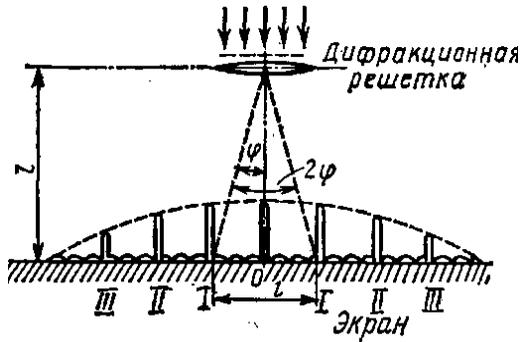


Рис. 11

Решение.

1. Постоянная d дифракционной решетки, длина волны λ и угол φ отклонения лучей, соответствующий k -му дифракционному максимуму, связаны соотношением:

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (1)$$

где k – порядок спектра, или в случае монохроматического света порядок максимума.

В данном случае $k = 1$, $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi$ (ввиду того, что $\frac{l}{2} \ll L$), $\operatorname{tg} \varphi = (l / 2) / L$ (следует из рис. 11). С учетом последних трех равенств соотношение (1) примет вид:

$$d \frac{l}{2L} = \lambda,$$

откуда постоянная решетки:

$$d = 2L\lambda / l.$$

Подставляя данные, получим: $d = 4,95$ мкм.

2. Число штрихов на 1 см найдем из формулы: $n = 1 / d$.

Подставляя числовые значения, получим: $n = 2,02 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$.

3. Для определения числа максимумов, даваемых дифракционной решеткой, вычислим сначала максимальное значение k_{\max} исхо-

дя из того, что максимальный угол отклонения лучей решеткой не может превышать 90° .

Из формулы (1) запишем:

$$k_{\max} = \frac{d}{\lambda} \sin \varphi. \quad (2)$$

Подставляя сюда значения величин, получим: $k_{\max} = 9,9$.

Число k обязательно должно быть целым. В то же время оно не может принять значение, равное 10, так как при этом значении $\sin \varphi$ должен быть больше единицы, что невозможно. Поэтому $k_{\max} = 9$.

Определим общее число максимумов дифракционной картины, полученной посредством дифракционной решетки. Влево и вправо от центрального максимума будет наблюдаться по одинаковому числу максимумов, равному k_{\max} , т. е. всего $2k_{\max}$. Если учесть также центральный нулевой максимум, получим общее число максимумов: $N = 2k_{\max} + 1$.

Подставляя значение k_{\max} найдем: $N = 2 \cdot 9 + 1 = 19$.

4. Для определения максимального угла отклонения лучей, соответствующего последнему дифракционному максимуму, выразим из соотношения (2) синус этого угла: $\sin \varphi_{\max} = k_{\max} \lambda / d$.

Отсюда

$$\varphi_{\max} = \arcsin(k_{\max} \lambda / d).$$

Подставив сюда значения величин λ , d , k_{\max} и произведя вычисления, получим: $\varphi_{\max} = 65,4^\circ$.

Пример 6. Два николя N_1 и N_2 расположены так, что угол α между их плоскостями пропускания равен 60° . При прохождении каждого из николей потери на отражение и поглощение света составляют 5%. Определить: 1) во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении через один николю (N_1); 2) во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении через оба николя?

Решение. Пучок естественного света, падая на грань николя N_1 (рис. 12), расщепляется вследствие двойного лучепреломления на два пучка: обыкновенный и необыкновенный.

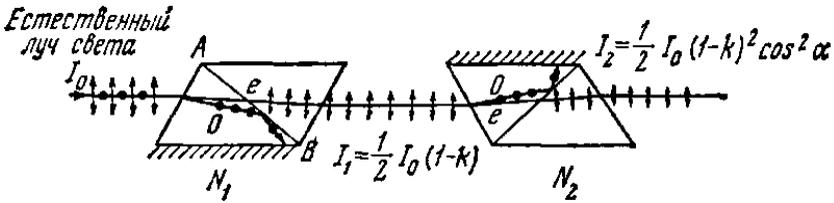


Рис. 12

Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний для необыкновенного пучка лежит в плоскости чертежа (плоскость главного сечения). Плоскость колебаний для обыкновенного пучка перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный пучок (*o*) вследствие полного отражения от границы *AB* отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею. Необыкновенный пучок (*e*) проходит через николю. При этом интенсивность света уменьшается вследствие поглощения в веществе николя. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через николю N_1 :

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k),$$

где $k = 0,05$ – относительная потеря интенсивности света в николе;

I_0 – интенсивность естественного света, падающего на николю N_1 .

Относительное уменьшение интенсивности света получим, разделив интенсивность I_0 естественного света на интенсивность I_1 поляризованного света:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{I_0}{(\frac{1}{2})I_0(1-k)} = \frac{2}{1-k}.$$

Подставив числовые значения, найдем: $\frac{I_0}{I_1} = 2,10$.

Таким образом, интенсивность света при прохождении через николю N_1 уменьшается в 2,10 раза.

Пример 7. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости

соответствует длине волны $\lambda = 500$ нм. Принимая Солнце за черное тело, определить. 1) энергетическую светимость M_e Солнца; 2) поток энергии Φ_e , излучаемый Солнцем; 3) массу m электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за 1 с.

Решение.

1. Энергетическая светимость M_e черного тела выражается формулой Стефана – Больцмана:

$$M_e = \sigma T^4. \quad (1)$$

Температура излучающей поверхности может быть определена из закона смещения Вина. $\lambda_m = \frac{b}{T}$. Выразив отсюда температуру T и подставив ее в формулу (1), получим:

$$M_e = \sigma(b\lambda_m)^4. \quad (2)$$

Произведя вычисления по формуле (2), найдем: $M_e = 64$ МВт/м².

2. Поток энергии Φ_e , излучаемый Солнцем, равен произведению энергетической светимости Солнца на площадь S его поверхности:

$$\Phi_e = 4\pi r^2 M_e, \quad (3)$$

где r – радиус Солнца.

Подставив в формулу (3) значения π , r и M_e и произведя вычисления, получим: $\Phi_e = 3,9 \cdot 10^{26}$ Вт.

3. Массу электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за время $t = 1$ с, определим, применив закон пропорциональности массы и энергии $E = mc^2$. Энергия электромагнитных волн, излучаемых за время t , равна произведению потока энергии Φ (мощности излучения) на время $E = \Phi_e t$. Следовательно, $\Phi_e t = mc^2$, откуда следует $m = \frac{\Phi_e t}{c^2}$.

Произведя вычисления по этой формуле, найдем: $m = 4,3 \cdot 10^9$ кг.

Пример 8. Длина волны λ_m , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости черного тела, равна 0,58 мкм. Определить максимальную спектральную плотность

энергетической светимости $(M_{\lambda,T})_{\max}$, рассчитанную на интервал длин волн $\Delta\lambda = 1$ нм вблизи λ_m .

Решение. Максимальная спектральная плотность энергетической светимости пропорциональна пятой степени температуры Кельвина и выражается формулой:

$$(M_{\lambda,T})_{\max} = CT^5. \quad (1)$$

Температуру T выразим из закона смещения Вина: $\lambda_m = b / T$, откуда $T = b / \lambda_m$. Подставив полученное выражение температуры в формулу (1), найдем:

$$(M_{\lambda,T})_{\max} = C(b / \lambda_m)^5. \quad (2)$$

Значение C в единицах СИ, в которых единичный интервал длин волн $\Delta\lambda = 1$ м, равно $1,30 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵).

По условию задачи требуется вычислить спектральную плотность энергетической светимости, рассчитанную на интервал длин волн $\Delta\lambda = 1$ нм, поэтому выпишем значение C в единицах СИ и пересчитаем его на заданный интервал длин волн:

$$\begin{aligned} C &= 1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5) = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{К}^5) = \\ &= 1,30 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{К}^5). \end{aligned}$$

Вычисление по формуле (2) дает: $(M_{\lambda,T})_{\max} = 40,6$ кВт/(м·нм).

Пример 9. Определить красную границу λ_0 фотоэффекта для цезия, если при облучении его поверхности фиолетовым светом длиной волны $\lambda = 400$ нм максимальная скорость v_{\max} фотоэлектронов равна 0,65 Мм/с.

Решение. При облучении светом, длина волны λ_0 которого соответствует красной границе фотоэффекта, скорость и кинетическая энергия фотоэлектронов равны нулю. Поэтому уравнение Эйнштейна для фотоэффекта $\varepsilon = A + T$ в случае красной границы запишется в виде:

$$\varepsilon = A,$$

или
$$\frac{hc}{\lambda_0} = A,$$

отсюда

$$\lambda_0 = hc / A. \quad (1)$$

Работу выхода для цезия:

$$A = \varepsilon - T = \frac{hc}{\lambda} - \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Числовые значения величин, выраженные в СИ: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $\lambda = 400$ нм = $4 \cdot 10^{-7}$ м; $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг; $v = 6,5 \cdot 10^5$ м/с.

Подставив эти значения величин в формулу (2) и вычислив, получим: $A = 3,05 \cdot 10^{-19}$ Дж = 0,305 аДж.

Для определения красной границы фотоэффекта подставим значения A , h и c в формулу (1) и вычислим: $\lambda_0 = 651$ нм.

Пример 10. В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол $\theta = 90^\circ$. Энергия ε' рассеянного фотона равна 0,4 МэВ. Определить энергию ε фотона до рассеяния.

Решение. Для определения энергии первичного фотона воспользуемся формулой Комптона в виде:

$$\lambda' - \lambda = 2[h / (mc)] \sin^2(\theta / 2). \quad (1)$$

Формулу (1) преобразуем следующим образом: 1) выразим длины волн λ' и λ через энергии ε' и ε соответствующих фотонов, воспользовавшись соотношением $\varepsilon = 2\pi\hbar c / \lambda$; 2) умножим числитель и знаменатель правой части формулы на c . Тогда получим:

$$\frac{hc}{\varepsilon'} - \frac{hc}{\varepsilon} = \frac{hc}{mc^2} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Сократив на hc , выразим из этой формулы искомую энергию:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon' mc^2}{mc^2 - 2\varepsilon' \sin^2(\theta / 2)} = \frac{\varepsilon' E_0}{E_0 - 2\varepsilon' \sin^2(\theta / 2)}. \quad (2)$$

Вычисления по формуле (2) удобнее вести во внесистемных единицах. Взяв из табл. 9 Приложения значение энергии покоя электрона E_0 в мегаэлектронвольтах и подставив числовые данные, получим: $\varepsilon = 1,85$ МэВ.

Пример 11. Определить энергию ε фотона, соответствующего второй линии в первой инфракрасной серии(серии Пашена) атома водорода.

Решение. Энергия ε фотона, излучаемого атомом водорода при переходе электрона с одной орбиты на другую:

$$\varepsilon = E_i \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где E_i – энергия ионизации атома водорода;

$n_1 = 1, 2, 3, \dots$ – номер орбиты, на которую переходит электрон;

$n_2 = n_1 + 1; n_1 + 2; \dots; n_1 + m$ – номер орбиты, с которой переходит электрон;

m – номер спектральной линии в данной серии.

Для серии Пашена $n_1 = 3$; для второй линии этой серии $m = 2$, $n_2 = n_1 + m = 3 + 2 = 5$.

Подставив числовые значения, найдем энергию фотона: $\varepsilon = 0,97$ эВ.

Пример 12. Вычислить дефект массы Δm и энергию связи $E_{св}$ ядра ${}^1_5\text{B}$.

Решение. Дефект массы ядра определим по формуле:

$$\Delta m = Zm_{1\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{ат}}. \quad (1)$$

Вычисление дефекта массы выполним во внесистемных единицах (а. е. м.). Для ядра ${}^1_5\text{B}$ зарядовое число $Z = 5$, массовое число $A = 11$. Массы нейтральных атомов водорода (${}^1_1\text{H}$) и бора (${}^{11}_5\text{B}$), а также нейтрона (n) найдем из табл. 10 Приложения.

Подставим найденные массы в выражение (1) и произведем вычисления:

$$\Delta m = [5 \cdot 1,00783 + (11 - 5) \cdot 1,00867 - 11,00931] \text{ а. е. м.},$$

или

$$\Delta m = 0,08186 \text{ а. е. м.}$$

Энергия связи ядра определяется соотношением:

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2. \quad (2)$$

Энергию связи ядра также найдем во внесистемных единицах (МэВ). Для этого дефект массы, выраженный в а. е. м., подставим в выражение (2), а коэффициент пропорциональности (c^2) – в МэВ/(а. е. м.), таким образом:

$$E_{\text{св}} = 931,4 \cdot 0,08186 \text{ МэВ} = 76,24 \text{ МэВ},$$

Округлим полученный результат до трех значащих цифр: $E_{\text{св}} = 76,2 \text{ МэВ}$.

2.3. Контрольные задачи к разделу 2

401. Два плоских прямоугольных зеркала образуют двугранный угол $\varphi = 179^\circ$. На расстоянии $l = 10$ см от линии соприкосновения зеркал и на одинаковом расстоянии от каждого из них находится точечный источник света. Определить расстояние d между мнимыми изображениями источника в зеркалах.

402. Фокусное расстояние f вогнутого зеркала равно 15 см. Зеркало дает действительное изображение предмета, уменьшенное в три раза. Определить расстояние a от предмета до зеркала.

403. Радиус R кривизны выпуклого зеркала равен 50 см. Предмет высотой $h = 15$ см находится на расстоянии, равном 1 м от зеркала. Определить расстояние b от зеркала до изображения и его высоту H .

404. Луч падает под углом $\varepsilon = 60^\circ$ на стеклянную пластинку толщиной $d = 30$ мм. Определить боковое смещение Δx луча после выхода из пластинки.

405. На стеклянную призму с преломляющим углом $\theta = 60^\circ$ падает луч света. Определить показатель преломления n стекла, если при симметричном ходе луча в призме угол отклонения $\sigma = 40^\circ$.

406. Преломляющий угол θ стеклянной призмы равен 30° . Луч света падает на грань призмы перпендикулярно ее поверхности и

выходит в воздух из другой грани, отклоняясь на угол $\sigma = 20^\circ$ от первоначального направления. Определить показатель преломления n стекла.

407. Линза, расположенная на оптической скамье между лампочкой и экраном, дает на экране резко увеличенное изображение лампочки. Когда лампочку передвинули на $\Delta l = 40$ см ближе к экрану, на нем появилось резко уменьшенное, изображение лампочки. Определить фокусное расстояние f линзы, если расстояние l от лампочки до экрана равно 80 см.

408. Человек движется вдоль главной оптической оси объектива фотоаппарата со скоростью $v = 5$ м/с. С какой скоростью u необходимо перемещать матовое стекло фотоаппарата, чтобы изображение человека на нем все время оставалось резким. Главное фокусное расстояние f объектива равно 20 см. Вычисления выполнить для случая, когда человек находился на расстоянии $a = 10$ м от фотоаппарата.

409. Двояковыпуклая линза имеет одинаковые радиусы кривизны поверхностей. При каком радиусе кривизны R поверхностей линзы главное фокусное расстояние f ее будет равно 20 см?

410. Тонкая линза, помещенная в воздухе, обладает оптической силой $\Phi_1 = 5$ дптр, а в некоторой жидкости $\Phi_2 = -0,48$ дптр. Определить показатель преломления n_2 жидкости, если показатель преломления n_1 стекла, из которого изготовлена линза, равен 1,52.

411. Человек без очков читает книгу, располагая ее перед собой на расстоянии $a = 12,5$ см. Какой оптической силы Φ очки следует ему носить?

412. Лупа, представляющая собой двояковыпуклую линзу, изготовлена из стекла с показателем преломления $n = 1,6$. Радиусы кривизны R поверхностей линзы одинаковы и равны 12 см. Определить увеличение Γ лупы.

413. Оптическая сила Φ объектива телескопа равна 0,5 дптр. Окуляр действует как лупа, дающая увеличение $\Gamma_1 = 10$. Какое увеличение Γ_2 дает телескоп?

414. Фокусное расстояние f_1 объектива микроскопа равно 8 мм, окуляра $-f_2 = 4$ см. Предмет находится на $\Delta a = 0,5$ мм дальше от объектива, чем главный фокус. Определить увеличение Γ микроскопа.

415. На пути пучка света поставлена стеклянная пластина толщиной $d = 1$ мм так, что угол падения луча $i_1 = 30^\circ$. На сколько изменится оптическая длина пути светового пучка?

416. На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ падает по нормали монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина d_{\min} пленки?

417. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус r_3 третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм равен $0,82$ мм. Радиус кривизны линзы $R = 0,5$ м.

418. Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном свете $r_2 = 0,4$ мм. Определить радиус R кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта, если она освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,64$ мкм.

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

420. Расстояние L от щелей до экрана в опыте Юнга равно 1 м. Определить расстояние между щелями, если на отрезке длиной $l = 1$ см укладывается $N = 10$ темных интерференционных полос. Длина волны $\lambda = 0,7$ мкм.

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

422. На тонкую глицериновую пленку толщиной $d = 1,5$ мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить длины волн лучей видимого участка спектра ($0,4 < \lambda < 0,8$ мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции.

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

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

425. Плосковыпуклая стеклянная линза с фокусным расстоянием $F = 1$ м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете $r_5 = 1,1$ мм. Определить длину световой волны λ .

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

427. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ($\lambda = 590$ нм). Радиус кривизны R линзы равен 5 см. Определить толщину d_3 воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье светлое кольцо.

428. Точечный источник света с $\lambda = 500$ нм помещен на расстоянии $a = 0,5$ м перед непрозрачной преградой с отверстием радиуса $r = 0,5$ мм. Определить расстояние b от преграды до точки, для которой число m открываемых отверстием зон Френеля будет равно: а) 1; б) 5; в) 10.

429. Точечный источник света с $\lambda = 550$ нм помещен на расстоянии $a = 1$ м перед непрозрачной преградой с отверстием радиуса $r = 2$ мм. Найти:

а) минимальное число m_{\min} открытых зон Френеля, которое может наблюдаться при этих условиях;

б) расстояние b от преграды до точки наблюдения, при котором получается минимально возможное число открытых зон;

в) радиус r отверстия, при котором может оказаться в условиях данной задачи открытой только одна центральная зона Френеля.

430. Исходя из определения зон Френеля, найти число m зон Френеля, которые открывают отверстие радиуса r для точки, находящейся на расстоянии b от центра отверстия, в случае если волна, падающая на отверстие, плоская.

431. На непрозрачную преграду с отверстием радиуса $r = 1$ мм падает плоская монохроматическая световая волна. Когда расстояние от преграды до установленного за ней экрана равно $b_1 = 0,575$ м, в центре дифракционной картины наблюдается максимум интенсивности. При увеличении расстояния до значения $b_2 = 0,862$ м максимум интенсивности сменяется минимумом. Определить длину волны λ света.

432. Интенсивность, создаваемая на экране некоторой монохроматической световой волной в отсутствие преград, равна I_0 . Какова будет интенсивность I в центре дифракционной картины, если на пути волны поставить преграду с круглым отверстием, открывающим: а) 1-ю зону Френеля; б) половину 1-й зоны Френеля; в) полторы зоны Френеля; г) треть 1-й зоны Френеля?

433. Свет от монохроматического источника ($\lambda = 0,6$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием. Диаметр отверстия 6 мм. За диафрагмой на расстоянии 3 м от нее находится экран. Узнать: 1) сколько зон Френеля укладывается в отверстии диафрагмы; 2) каким будет центр дифракционной картины на экране: темным или светлым?

434. Вычислить радиусы первых пяти зон Френеля, если расстояние от источника света до волновой поверхности равно 1 м, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения также равно 1 м и $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м.

435. Вычислить радиусы первых пяти зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1 м. Длина волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м.

436. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см). На расстоянии $0,5l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром 1 см. Чему равно расстояние l , если преграда закрывает только центральную зону Френеля?

437. На пластину с щелью, ширина которой $a = 0,05$ мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,7$ мкм. Определить угол φ отклонения лучей, соответствующий первому дифракционному максимуму.

438. Какое наименьшее число N_{\min} штрихов должна содержать дифракционная решетка, чтобы в спектре второго порядка можно

было видеть раздельно две желтые линии натрия с длинами волн $\lambda_1 = 589$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм? Какова длина l такой решетки, если постоянная решетки $d = 5$ мкм?

439. Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр третьего порядка на угол $\varphi_1 = 30^\circ$. На какой угол φ_2 отклоняет она спектр четвертого порядка?

440. На поверхность дифракционной решетки нормально к ее поверхности падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в $n = 4,6$ раза больше длины световой волны. Найти общее число дифракционных максимумов m_{\max} , которые теоретически можно наблюдать в данном случае.

441. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ($\lambda = 780$ нм) спектра третьего порядка?

442. На дифракционную решетку, содержащую $n = 600$ штрихов на миллиметр, падает нормально белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину l спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана $11,2$ м. Границы видимого спектра: $\lambda_{\text{кр}} = 780$ нм, $\lambda_{\text{ф}} = 400$ нм.

443. На грань кристалла каменной соли падает параллельный пучок рентгеновского излучения. Расстояние между атомными плоскостями равно 280 пм. Под углом в $\theta = 65^\circ$ к атомной плоскости наблюдается дифракционный максимум первого порядка. Определить длину волны λ рентгеновского излучения.

444. На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна ($\lambda = 600$ нм). Угол отклонения лучей $\varphi = 20^\circ$ соответствует второму дифракционному максимуму. Определить ширину a щели.

445. На дифракционную решетку, содержащую $n = 100$ штрихов на 1 мм, нормально падает монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум второго порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол $\Delta\varphi = 16^\circ$. Определить длину волны λ света, падающего на решетку.

446. На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 410$ нм). Угол $\Delta\varphi$ между направлениями на максимумы первого и второго порядка равен $2^\circ 21'$. Определить число n штрихов на 1 мм дифракционной решетки.

447. Постоянная дифракционной решетки в $n = 4$ раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол α между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

448. Расстояние между штрихами дифракционной решетки $d = 4$ мкм. На решетку падает нормально свет длиной волны $\lambda = 0,58$ мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

449. Определить угловую дисперсию дифракционной решетки для $\lambda = 589$ нм в спектре первого порядка. Постоянная решетки равна $2,5 \cdot 10^{-4}$ см.

450. Угловая дисперсия дифракционной решетки для $\lambda = 668$ нм в спектре первого порядка равна $2,02 \cdot 10^5$ рад/м. Найти период дифракционной решетки.

451. Найти линейную дисперсию (в мм/мм) дифракционной решетки, угловая дисперсия которой для $\lambda = 668$ нм в спектре первого порядка равна $2,02 \cdot 10^5$ рад/м, если фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран, равно 40 см.

452. На каком расстоянии друг от друга будут находиться на экране две линии ртутной дуги ($\lambda_1 = 577$ нм и $\lambda_2 = 579,1$ нм) в спектре первого порядка, полученном при помощи дифракционной решетки с периодом $2 \cdot 10^{-4}$ см? Фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран, равно 0,6 м.

453. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ($\lambda = 630$ нм) видна в спектре третьего порядка под углом $\varphi = 60^\circ$. 1) Какая спектральная линия видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? 2) Какое число штрихов на 1 мм длины имеет дифракционная решетка? 3) Чему равна угловая дисперсия этой решетки для линии $\lambda = 630$ нм в спектре третьего порядка?

454. Для какой длины волны дифракционная решетка с постоянной $d = 5$ мкм имеет угловую дисперсию $D = 6,3 \cdot 10^5$ рад/м в спектре третьего порядка?

455. Почему в случае отражательной решетки удается наблюдать дифракционные максимумы малых порядков при периодах решеток d , намного больших длины волны λ , например, при $d \sim 1$ мм?

456. Можно ли различить невооруженным глазом два находящихся на расстоянии 5 км столба, стоящих друг от друга на расстоянии 1 м? Диаметр зрачка принять равным 4 мм.

457. В зрительную трубу рассматривается лунная поверхность. Диаметр объектива трубы $d = 4,00$ см. При каком минимальном расстоянии a_{\min} между двумя кратерами их можно увидеть раздельно? Длину световой волны принять равной 600 нм.

458. Пластинку кварца толщиной $d = 2$ мм поместили между параллельными призмами Николя, в результате чего плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол $\varphi = 53^\circ$. Какой наименьшей толщины следует взять пластинку, чтобы поле зрения поляризатора стало совершенно темным?

459. Параллельный пучок света переходит из глицерина в стекло так, что пучок, отраженный от границы раздела этих сред, оказывается максимально поляризованным. Определить угол φ между падающим и преломленным пучком.

460. Кварцевую пластинку поместили между скрещенными призмами Николя. При какой наименьшей толщине d_{\min} кварцевой пластины поле зрения между призмами Николя будет максимально просветлено? Постоянная вращения α кварца равна 27 град/мм.

461. При прохождении света через трубку длиной $l_1 = 20$ см, содержащую раствор сахара концентрацией $C_1 = 10$ %, плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi_1 = 13,3^\circ$. В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной $l_2 = 15$ см, плоскость поляризации повернулась на угол $\varphi_2 = 5,2^\circ$. Определить концентрацию C_2 второго раствора.

462. Пучок света последовательно проходит через две призмы Николя, плоскости пропускания которых образуют между собой угол $\varphi = 40^\circ$. Принимая, что коэффициент поглощения k каждой призмы равен $0,15$, найти во сколько раз пучок света, выходящий из второй призмы ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первую призму.

463. На сколько процентов уменьшается интенсивность света после прохождения через призму Николя, если потери света составляют 10 %?

464. Угол падения ε_1 луча на поверхность стекла равен 60° . При этом отраженный пучок света оказался максимально поляризованным. Определить угол ε_2 преломления луча.

465. Угол преломления луча в жидкости $i_2 = 35^\circ$. Определить показатель преломления n жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.

466. Угол α между плоскостями пропускания поляроидов равен 50° . Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в $n = 8$ раз. Пренебрегая потерей света при отражении, определить коэффициент поглощения k света в поляроидах.

467. Пучок света, идущий в стеклянном сосуде с глицерином, отражается от дна сосуда. При каком угле падения ε отраженный пучок света максимально поляризован?

468. Пучок света переходит из жидкости в стекло. Угол падения ε_1 пучка равен 60° , угол преломления $\varepsilon_2 = 50^\circ$. При каком угле падения ε_B пучок света, отраженный от границы раздела этих сред, будет максимально поляризован?

469. Пучок света падает на плоскопараллельную стеклянную пластину, нижняя поверхность которой находится в воде. При каком угле падения ε_B свет, отраженный от границы стекло – вода, будет максимально поляризован?

470. Частица движется со скоростью $v = c / 3$, где c – скорость света в вакууме. Какую долю энергии покоя составляет кинетическая энергия частицы?

471. При какой скорости β (в долях скорости света) релятивистская масса любой частицы вещества в $n = 3$ раза больше массы покоя?

472. Определить отношение релятивистского импульса электрона с кинетической энергией $T = 1,53$ МэВ к комптоновскому импульсу m_0c электрона.

473. Скорость электрона $v = 0,8c$, где c – скорость света в вакууме. Зная энергию покоя электрона в единицах МэВ, определить в тех же единицах кинетическую энергию T электрона.

474. Протон имеет импульс $p = 469$ МэВ/с (1 МэВ/с = $5,33 \times 10^{-22}$ кг м/с). Какую кинетическую энергию необходимо дополнительно сообщить протону, чтобы его релятивистский импульс возрос вдвое?

475. Во сколько раз релятивистская масса m электрона, обладающего кинетической энергией $T = 1,53$ МэВ, больше массы покоя m_0 ?

476. Какую скорость β (в долях скорости света) нужно сообщить частице, чтобы ее кинетическая энергия была равна удвоенной энергии покоя?

477. При какой скорости v релятивистская масса частицы в $k = 3$ раза больше ее массы покоя?

478. Релятивистский электрон имел импульс $p_1 = m_0 c$. Определить конечный импульс этого электрона (в единицах $m_0 c$), если его энергия увеличилась в $n = 2$ раза.

479. Определить скорость v электрона, имеющего кинетическую энергию $T = 1,53$ МэВ.

480. Релятивистский протон обладал кинетической энергией, равной энергии покоя. Определить, во сколько раз возрастет его кинетическая энергия, если его импульс увеличится в $n = 2$ раза.

481. Электрон движется, со скоростью $v = 0,6 c$, где c – скорость света в вакууме. Определить релятивистский импульс p электрона.

482. Вычислить истинную температуру T вольфрамовой раскаленной ленты, если радиационный пирометр показывает температуру $T_{\text{рад}} = 2,5$ кК. Принять, что поглощающая способность для вольфрама не зависит от частоты излучения и равна $a = 0,35$.

483. Вычислить энергию, излучаемую за время $t = 1$ мин с площади $S = 1$ см² абсолютно черного тела, температура которого $T = 000$ К.

484. Черное тело имеет температуру $T_1 = 500$ К. Какова будет температура T_2 тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в $n = 5$ раз?

485. Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, $\lambda_m = 0,6$ мкм. Определить температуру T тела.

486. Температура абсолютно черного тела $T = 2$ кК. Определить длину волны λ_m , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, и спектральную плотность энергетической светимости $(r_{\lambda, T})_{\text{max}}$ для этой длины волны.

487. Определить максимальную спектральную плотность $(r_{\lambda, T})_{\text{max}}$ энергетической светимости, рассчитанную на 1 нм в спектре излучения абсолютно черного тела. Температура тела $T = 1$ К.

488. Определить температуру T и энергетическую светимость R_e абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны $\lambda_m = 600$ нм.

489. Из смотрового окошечка печи излучается поток $\Phi_e = 4$ кДж/мин. Определить температуру T печи, если площадь окошечка $S = 8$ см².

490. Поток излучения абсолютно черного тела $\Phi_e = 10$ кВт. Максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны $\lambda_m = 0,8$ мкм. Определить площадь S излучающей поверхности.

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

492. Определить поглощательную способность a серого тела, для которого температура, измеренная радиационным пирометром, $T_{\text{рад}} = 1,4$ кК, тогда как истинная температура T тела равна $3,2$ кК.

493. Муфельная печь, потребляющая мощность которой $P = 1$ кВт, имеет отверстие площадью $S = 100$ см². Определить долю η мощности, рассеиваемой стенками печи, если температура ее внутренней поверхности равна 1 кК.

494. Средняя энергетическая светимость R поверхности Земли равна $0,54$ Дж/(см²·мин). Какова должна быть температура T поверхности Земли, если условно считать, что она излучает как серое тело с коэффициентом черноты $a = 0,25$?

495. Определить энергию ε , массу m и импульс p фотона с длиной волны $\lambda = 1,24$ нм.

496. Красная граница фотоэффекта для цинка $\lambda_o = 310$ нм. Определить максимальную кинетическую энергию T_{max} фотоэлектронов в электронвольтах, если на цинк падает свет с длиной волны $\lambda = 200$ нм.

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

498. Фотон с энергией $\varepsilon = 10$ эВ падает на серебряную пластину и вызывает фотоэффект. Определить импульс p , полученный пластиной, если принять, что направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластин.

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

500. На пластину падает монохроматический свет ($\lambda = 0,42$ мкм). Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов $U = 0,95$ В. Определить работу A выхода электронов с поверхности пластины.

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

502. На цинковую пластину падает пучок ультрафиолетового излучения ($\lambda = 0,2$ мкм). Определить максимальную кинетическую энергию T_{\max} и максимальную скорость v_{\max} фотоэлектронов.

503. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения ($\lambda = 0,25$ мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов $U_{\min} = 0,96$ В. Определить работу выхода A электронов из металла.

504. Определить максимальную скорость v_{\max} фотоэлектрона, вырванного с поверхности металла γ -квантом с энергией $\varepsilon = 1,53$ МэВ.

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

506. На металл падает рентгеновское излучение с длиной волны $\lambda = 1$ нм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость v_{\max} фотоэлектронов.

507. На металлическую пластину направлен монохроматический пучок света с частотой $\nu = 7,3 \cdot 10^{14}$ Гц. Красная граница λ_0 фотоэффекта для данного материала равна 560 нм. Определить максимальную скорость v_{\max} фотоэлектронов.

508. На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов $U = 1,5$ В. Определить длину волны λ света, падающего на пластину.

509. Определить угол θ рассеяния фотона после соударения со свободным электроном, если изменение длины волны при рассеянии $\Delta\lambda = 3,63$ пм.

510. Фотон при эффекте Комптона на свободном электро­не был рассеян на угол $\theta = \pi/2$. Определить импульс p (в МэВ/с), приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была $\varepsilon_1 = 1,02$ МэВ ($1 \text{ МэВ/с} = 5,33 \cdot 10^{-22} \text{ кг м/с}$).

511. Рентгеновское излучение ($\lambda = 1 \text{ нм}$) рассеивается электронами, которые можно считать свободными. Определить максимальную длину волны λ_{\max} рентгеновского излучения в рассеянном пучке.

512. Фотон с энергией ε_1 , равной энергии покоя электрона (m_0c^2), рассеялся на свободном электро­не на угол $\theta = 120^\circ$. Определить энергию ε_2 рассеянного фотона и кинетическую энергию T электрона отдачи (в единицах m_0c^2).

513. Какая доля энергии фотона при эффекте Комптона приходится на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол $\theta = \pi/2$? Энергия фотона до рассеяния $\varepsilon_1 = 0,51$ МэВ.

514. Определить максимальное изменение длины волны $(\Delta\lambda)_{\max}$, при комптоновском рассеянии света на свободных электронах и свободных протонах.

515. Фотон с длиной волны $\lambda_1 = 15 \text{ пм}$ рассеялся на свободном электро­не. Длина волны рассеянного фотона $\lambda_2 = 16 \text{ пм}$. Определить угол θ рассеяния.

516. Фотон с энергией $\varepsilon_1 = 0,51$ МэВ был рассеян при эффекте Комптона на свободном электро­не на угол $\theta = 180^\circ$. Определить кинетическую энергию T электрона отдачи.

517. В результате эффекта Комптона фотон с энергией $\varepsilon_1 = 1,02$ МэВ рассеян на свободных электронах на угол $\theta = 150^\circ$. Определить энергию ε_1 рассеянного фотона.

518. Определить угол θ , на который был рассеян квант с энергией $\varepsilon_1 = 1,53$ МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи $T = 0,51$ МэВ.

519. Фотон с энергией $\varepsilon_1 = 0,51$ МэВ при рассеянии на свободном электро­не потерял половину своей энергии. Определить угол рассеяния θ .

520. Определить импульс p_e электрона отдачи, если фотон с энергией $\varepsilon_1 = 1,53$ МэВ в результате рассеяния на свободном электро­не потерял $1/3$ своей энергии.

521. Определить энергетическую освещенность E_e зеркальной поверхности, если давление p , производимое излучением, равно 40 мкПа. Излучение падает нормально к поверхности.

522. Поток энергии, излучаемой электрической лампой, $\Phi_e = 600$ Вт. На расстоянии $r = 1$ м от лампы перпендикулярно падающим лучам расположено круглое плоское зеркальце диаметром $d = 2$ см. Определить силу F светового давления на зеркальце. Лампу рассматривать как точечный изотропный излучатель.

523. Давление p света с длиной волны $\lambda = 40$ нм, падающего нормально на черную поверхность, равно 2 нПа. Определить число N фотонов, падающих за время $t = 10$ с на площадь $S = 1$ мм² этой поверхности.

524. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 0,663$ мкм падает на зачерненную поверхность и производит на нее давление $p = 0,3$ мкПа. Определить концентрацию n фотонов в световом пучке.

525. Определить коэффициент отражения ρ поверхности, если при энергетической освещенности $E_e = 120$ Вт/м² давление p света на нее оказалось равным 0,5 мкПа.

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

527. На расстоянии $r = 5$ м от точечного монохроматического ($\lambda = 0,5$ мкм) изотропного источника расположена площадка ($S = 8$ мм²) перпендикулярно падающим пучкам. Определить число N фотонов, ежесекундно падающих на площадку. Мощность излучения $P = 100$ Вт.

528. На зеркальную поверхность под углом $\alpha = 60^\circ$ к нормали падает пучок монохроматического света ($\lambda = 590$ нм). Плотность потока энергии света $\Phi = 1$ кВт/м². Определить давление p , производимое светом на зеркальную поверхность.

529. Свет падает нормально на зеркальную поверхность, находящуюся на расстоянии $r = 10$ см от точечного изотропного излучателя. При какой мощности P излучателя давление p на зеркальную поверхность будет равным 1 мПа?

530. Свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление $p = 4$ мкПа.

Определить число N фотонов, падающих за время $t = 10$ с на площадь $S = 1 \text{ мм}^2$ этой поверхности.

531. На зеркальную поверхность площадью $S = 6 \text{ см}^2$ падает нормально поток излучения $\Phi_e = 0,8 \text{ Вт}$. Определить давление p и силу давления F света на эту поверхность.

532. Точечный источник монохроматического ($\lambda = 1 \text{ нм}$) излучения находится в центре сферической зачерненной колбы радиусом $R = 10 \text{ см}$. Определить световое давление p , производимое на внутреннюю поверхность колбы, если мощность источника $P = 1 \text{ кВт}$.

533. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны $\lambda = 102,6 \text{ нм}$. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус r электронной орбиты возбужденного атома водорода.

534. Определить энергию ε фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной уровень.

535. Вычислить по теории Бора радиус r_2 второй стационарной орбиты и скорость v_2 электрона на этой орбите для атома водорода.

536. Вычислить по теории Бора период T вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом $n = 2$.

537. Определить изменение энергии ΔE электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с частотой $\nu = 6,28 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

538. Во сколько раз изменится период T вращения электрона в атоме водорода, если при переходе в невозбужденное состояние атом излучил фотон с длиной волны $\lambda = 97,5 \text{ нм}$?

539. На сколько изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны $\lambda = 435 \text{ нм}$?

540. В каких пределах $\Delta \lambda$ должна лежать длина волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света радиус r орбиты электрона увеличился в 16 раз?

541. В однозарядном ионе лития электрон перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить длину волны λ излучения, испущенного ионом лития.

542. Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определить кинетическую T , потенциальную Π и полную E энергию электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

543. Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией $E = 10$ эВ. Определить энергию ϵ фотона.

544. Вычислить длину волны де Бройля λ для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U = 22,5$ В.

545. Вычислить длину волны де Бройля λ для протона, движущегося со скоростью $v = 0,6c$ (c – скорость света в вакууме).

546. Вычислить наиболее вероятную длину волны де Бройля λ молекул азота, содержащихся в воздухе при комнатной температуре.

547. Определить кинетическую энергию ΔT , которую необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его длина волны де Бройля уменьшилась от $\lambda_1 = 0,2$ мм до $\lambda_2 = 0,1$ мм.

548. На сколько по отношению к комнатной должна измениться температура идеального газа, чтобы длина волны де Бройля λ его молекул уменьшилась на 20 %?

549. Параллельный пучок моноэнергетических электронов падает нормально на диафрагму в виде узкой прямоугольной щели, ширина которой $a = 0,06$ мм. Определить скорость этих электронов, если известно, что на экране, отстоящем от щели на расстоянии $l = 40$ мм, ширина центрального дифракционного максимума $b = 10$ мкм.

550. При каких значениях кинетической энергии T электрона ошибка в определении длины волны де Бройля λ по нерелятивистской формуле не превышает 10 %?

551. Из катодной трубки на диафрагму с узкой прямоугольной щелью нормально к плоскости диафрагмы направлен поток моноэнергетических электронов. Определить анодное напряжение трубки, если известно, что на экране, отстоящем от щели на расстоянии $l = 0,5$ м, ширина центрального дифракционного максимума $\Delta x = 10,0$ мкм. Ширину b щели принять равной 0,10 мм.

552. Протон обладает кинетической энергией $T = 1$ кэВ. Определить дополнительную энергию ΔT , которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волны λ де Бройля уменьшилась в три раза.

553. Определить длины волн де Бройля α -частицы и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ кВ.

554. Электрон обладает кинетической энергией $T = 1,02$ МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия T электрона уменьшится вдвое?

555. Кинетическая энергия T электрона равна удвоенному значению его энергии покоя ($2m_0c^2$). Вычислить длину волны λ де Бройля для такого электрона.

556. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию электрона, движущегося внутри сферы радиусом $R = 0,05$ нм.

557. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию T_{\min} электрона, движущегося внутри сферической области диаметром $d = 0,1$ нм.

558. Определить относительную неопределенность $\Delta p / p$ импульса движущейся частицы, если допустить, что неопределенность ее координаты равна длине волны де Бройля.

559. Используя соотношение неопределенностей, оценить наименьшие ошибки Δv в определении скорости электрона и протона, если координаты центра масс этих частиц могут быть установлены с неопределенностью 1 мкм.

560. Какова должна быть кинетическая энергия T протона в моноэнергетическом пучке, используемого для исследования структуры с линейными размерами $l \approx 10^{-13}$ см?

561. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину l одномерного потенциального ящика, в котором минимальная энергия электрона $E_{\min} = 10$ эВ.

562. Альфа-частица находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину l ящика, если известно, что минимальная энергия α -частицы $E_{\min} = 8$ МэВ.

563. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии составляет $\Delta t = 10^{-8}$ с. При переходе атома в нормальное состояние испускается фотон, средняя длина волны $\langle \lambda \rangle$ которого равна 600 нм. Оценить ширину излучаемой спектральной линии $\Delta \lambda$, если не происходит ее уширения за счет других процессов.

564. Для приближенной оценки минимальной энергии электрона в атоме водорода можно предположить, что неопределенность Δr радиуса r электронной орбиты и неопределенность Δp импульса p электрона на такой орбите соответственно связаны следующим образом: $\Delta r \approx r$ и $\Delta p \approx p$. Используя эти соотношения, найти значение радиуса электронной орбиты, соответствующего минимальной энергии электрона в атоме водорода.

565. Моноэнергетический пучок электронов высвечивает в центре экрана электронно-лучевой трубки пятно радиусом $r \approx 10$ см. Пользуясь соотношением неопределенностей, найти, во сколько раз неопределенность Δx координаты электрона на экране в направлении, перпендикулярном оси трубки, меньше размера r пятна. Длину L электронно-лучевой трубки принять равной 0,50 м, а ускоряющее электрон напряжение U – равным 20 кВ.

566. Среднее время жизни Δt атома в возбужденном состоянии – около 10^{-8} с. При переходе атома в нормальное состояние испускается фотон, средняя длина волны $\langle \lambda \rangle$ которого равна 400 нм. Оценить относительную ширину $\Delta \lambda / \lambda$, излучаемой спектральной линии, если не происходит уширения линии за счет других процессов.

567. Для приближенной оценки минимальной энергии электрона в атоме водорода можно предположить, что неопределенность Δr радиуса r электронной орбиты и неопределенность Δp импульса p электрона на такой орбите соответственно связаны следующим образом: $\Delta r \approx r$ и $\Delta p \approx p$. Используя эти связи, а также соотношение неопределенностей, определить минимальное значение энергии T_{\min} электрона в атоме водорода.

568. Частица находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике. Найти отношение разности $\Delta E_{n, n+1}$ соседних энергетических уровней к энергии E_n частицы в трех случаях: 1) $n = 2$; 2) $n = 5$; 3) $n \rightarrow \infty$.

569. Электрон находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике шириной $l = 0,1$ нм. Определить в электрон-вольтах наименьшую разность энергетических уровней электрона.

570. Электрон находится в прямоугольном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками. Ширина ящика $l = 0,2$ нм, энергия электрона в ящике $E = 37,8$ эВ. Определить номер n энергетического уровня и модуль волнового вектора ($k = 2\pi / \lambda$).

571. Частица в потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы: 1) в средней трети ящика; 2) в крайней трети ящика?

572. Частица в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике шириной l находится в возбужденном состоянии ($n = 3$). Определить, в каких точках интервала $0 < x < l$

плотность вероятности нахождения частицы имеет максимальное и минимальное значения.

573. В прямоугольной потенциальной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками ($0 < x < l$) находится частица в основном состоянии. Найти вероятность w местонахождения этой частицы в области $0,25l < x < 0,75l$.

574. Частица в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность w обнаружения частицы в крайней четверти ящика?

575. Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид $\psi(r) = A \exp(-r / a_0)$, где A – некоторая постоянная; a_0 – первый боровский радиус. Найти для основного состояния атома водорода наиболее вероятное расстояние электрона от ядра.

576. Частица находится в основном состоянии в прямоугольной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками. Во сколько раз отличаются вероятности местонахождения частицы: w_1 – в крайней трети и w_2 – в крайней четверти ящика?

577. Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид $\psi(r) = A \exp(-r / a_0)$, где A – некоторая постоянная; a_0 – первый боровский радиус. Найти для основного состояния атома водорода среднее значение $\langle F \rangle$ кулоновской силы.

578. Электрон находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике шириной l . В каких точках в интервале $0 < x < l$ плотности вероятности нахождения электрона на втором и третьем энергетических уровнях одинаковы? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение пояснить графиком.

579. Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид $\psi(r) = A \exp(-r / a_0)$, где A – некоторая постоянная; a_0 – первый боровский радиус. Найти для основного состояния атома водорода среднее значение $\langle \Pi \rangle$ потенциальной энергии.

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

581. Определить, какая доля радиоактивного изотопа ${}_{89}\text{Ac}^{225}$ распадается в течение времени $t = 6$ сут.

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

583. Определить массу m изотопа ${}_{53}\text{I}^{131}$, имеющего активность $A = 37$ ГБк.

584. Найти среднюю продолжительность жизни τ атома радиоактивного изотопа кобальта ${}_{27}\text{Co}^{60}$.

585. Счетчик α -частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал $N_1 = 1400$ частиц в минуту, а через время $t = 4$ ч – только $N_2 = 400$. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

586. Во сколько раз уменьшится активность изотопа ${}_{15}\text{P}^{32}$ через время $t = 20$ сут?

587. На сколько процентов уменьшится активность изотопа иридия ${}_{77}\text{Ir}^{192}$ за время $t = 15$ сут?

588. Определить число N ядер, распадающихся в течение времени: 1) $t_1 = 1$ мин; 2) $t_2 = 5$ сут – в радиоактивном изотопе фосфора ${}_{15}\text{P}^{32}$ массой $m = 1$ мг.

589. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

590. Вычислить энергию связи $E_{\text{св}}$ ядра дейтерия ${}^1_1\text{H}^2$ и трития ${}^1_1\text{H}^3$.

591. Определить число N атомов радиоактивного препарата йода ${}_{53}\text{I}^{131}$ массой $m = 0,5$ мкг, распавшихся в течение времени: 1) $t_1 = 1$ мин; 2) $t_2 = 7$ суток.

592. Определить активность A радиоактивного препарата массой $m = 0,1$ мкг.

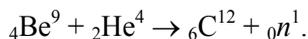
593. Сколько атомов полония распадается за сутки из 1 млн атомов?

594. Сколько атомов эманации радия (радона) распадается за сутки из 1 млн атомов?

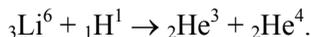
595. Природный уран представляет собой смесь трех изотопов: ${}_{92}\text{U}^{234}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{92}\text{U}^{238}$. Содержание урана ${}_{92}\text{U}^{234}$ ничтожно (0,006 %), на долю ${}_{92}\text{U}^{235}$ приходится 0,71 %, а остальную массу (99,28 %) составляет уран ${}_{92}\text{U}^{238}$. Периоды полураспада этих изотопов соответственно равны $2,5 \cdot 10^5$ лет, $7,1 \cdot 10^8$ лет и $4,5 \cdot 10^9$ лет соответственно. Вычислить процентную долю радиоактивности, вносимую каждым изотопом в общую радиоактивность природного урана.

596. К 10 мг радиоактивного изотопа ${}_{20}\text{Ca}^{45}$ примешано 30 мг не- радиоактивного изотопа ${}_{20}\text{Ca}^{40}$. Насколько уменьшилась удельная активность препарата?

597. Вычислить энергетический эффект Q реакции:



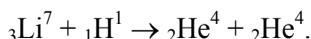
То же, для реакции:



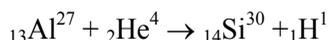
598. Найти число протонов и нейтронов, входящих в состав ядер трех изотопов магния: 1) ${}_{12}\text{Mg}^{24}$, 2) ${}_{12}\text{Mg}^{25}$ и 3) ${}_{12}\text{Mg}^{26}$.

599. Найти энергию связи ядра изотопа лития ${}_3\text{Li}^7$.

600. Найти энергию, освобождающуюся при ядерной реакции:



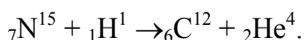
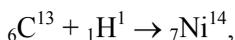
601. Какая энергия выделится, если при реакции



подвергаются превращению все ядра, находящиеся в 1 г алюминия?

Какую энергию надо затратить, чтобы осуществить это превращение, если известно, что при бомбардировке ядра алюминия α -частицами с энергией в 8 МэВ только одна α -частица из $2 \cdot 10^6$ частиц вызывает превращение?

602. Принимая, что источником энергии солнечного излучения является энергия образования гелия из водорода по следующей циклической реакции:



Подсчитать, сколько тонн водорода каждую секунду должно превращаться в гелий. Солнечная постоянная равна $1,96 \text{ кал}/(\text{см}^2 \text{ мин})$. Принимая, что водород составляет 35 % массы Солнца, подсчитать, на сколько лет хватит запаса водорода, если излучение Солнца считать неизменным.

603. В реакции ${}^7\text{N}^{14}(\alpha, p)$ кинетическая энергия α -частицы равна $W = 7,7 \text{ МэВ}$. Найти, под каким углом к направлению движения α -частицы вылетает протон, если известно, что его кинетическая энергия $W = 8,5 \text{ МэВ}$.

604. Изотоп гелия ${}^3\text{He}$ получается бомбардировкой ядер трития ${}^3\text{H}$ протонами. Написать уравнение ядерной реакции. Найти энергию, выделяющуюся при этой реакции. Найти «порог» ядерной реакции, т. е. найти минимальное значение кинетической энергии бомбардирующей частицы, при которой происходит эта реакция. Учесть, что при пороговом значении кинетической энергии бомбардирующей частицы относительная скорость частиц, возникающих в результате реакции, равна нулю.

3. ТАБЛИЦЫ ВАРИАНТОВ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Номера задач для специальностей, учебными планами которых предусмотрено изучение общей физики по разделам «Электромагнетизм», «Оптика. Элементы атомной и ядерной физики» следует взять из табл. 1.

Варианты 11*,12* являются дополнительными и могут быть назначены преподавателем индивидуально.

Таблица 1

Вариант	Номера задач								
	0	301	311	342	415	431	458	483	521
1	302	312	364	416	432	459	510	534	582
2	303	314	344	417	437	460	523	535	583
3	304	315	366	418	438	461	486	524	584
4	305	316	367	419	442	462	513	537	585
5	306	322	373	420	443	463	488	538	586
6	307	323	353	421	445	464	515	539	587
7	308	324	375	422	448	465	504	528	588
8	309	325	377	423	450	466	517	541	589
9	310	326	378	424	451	467	518	542	590
11*	311	327	379	425	452	468	519	543	591
12*	312	328	380	426	453	469	520	544	592

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Основные физические постоянные (округленные значения), используемые в разделах 1, 2

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Элементарный заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Магнетон Бора	μ_B	$0,927 \cdot 10^{-23}$ А·м ²
Скорость света в вакууме	c	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Стефана – Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
Постоянная закона смещения Вина	b	$2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Планка	\hbar	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	R	$1,10 \cdot 10^{-7}$ м ⁻¹
Радиус Бора	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Комптоновская длина волны электрона	λ	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)
Атомная единица массы	а. е. м.	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг

2. Относительные атомные массы A (округленные значения) и порядковые номера Z некоторых элементов

Элемент	Символ	A	Z	Элемент	Символ	A	Z
Азот	N	14	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	13	Медь	Cu	64	29
Аргон	Ar	40	18	Молибден	Mo	96	42
Барий	Ba	137	56	Натрий	Na	23	11
Ванадий	V	60	23	Неон	Ne	20	10
Водород	H	1	1	Никель	Ni	59	28
Вольфрам	W	184	74	Олово	Sn	119	50
Гелий	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Железо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сера	S	32	16
Калий	K	39	19	Серебро	Ag	108	47
Кальций	Ca	40	20	Углерод	C	12	6
Кислород	O	16	8	Уран	U	238	92
Магний	Mg	24	12	Хлор	Cl	35	17

3. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
Экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
Пэта	П	10^{15}	санتي	с	10^{-2}
Тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
Гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
Мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
Кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
Гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
Дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

4. Периоды полураспада некоторых изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада	Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 сут	Радий	${}_{86}\text{Ra}^{226}$	1620 лет
Йод	${}_{53}\text{I}^{131}$	8 сут	Радон	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,8 сут
Кобальт	${}_{27}\text{Co}^{60}$	5,3 г	Стронций	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	28 лет
Магний	${}_{12}\text{Mg}^{27}$	10 мин	Фосфор	${}_{15}\text{P}^{32}$	14,3 сут
Полоний	${}_{84}\text{Po}^{210}$	138 сут	Церий	${}_{58}\text{Ce}^{144}$	285 сут
Иридий	${}_{77}\text{Ir}^{92}$	75 сут	Торий	${}_{90}\text{Th}^{229}$	7000 лет

5. Энергия ионизации некоторых элементов

Вещество	E_i , Дж	E_i , эВ
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1,21 \cdot 10^{-18}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

6. Греческий алфавит

Обозначения букв	Названия букв	Обозначения букв	Названия букв
А, α	альфа	Ν, ν	ню
В, β	бета	Ξ, ξ	кси
Г, γ	гамма	Ο, \omicron	омикрон
Δ, δ	дэльта	Π, π	пи
Ε, ϵ	эпсилон	Ρ, ρ	ро
Ζ, ζ	дзета	Σ, σ	сигма
Η, η	эта	Τ, τ	тау
Θ, θ	тэта	Υ, υ	ипсилон
Ι, ι	йота	Φ, ϕ	фи
Κ, κ	каппа	Χ, χ	хи
Λ, λ	лямбда	Ψ, ψ	пси
Μ, μ	ми	Ω, ω	омега

7. Показатели преломления некоторых веществ

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

8. Работы выхода электронов для некоторых элементов

Металл	A , Дж	A , эВ	Металл	A , Дж	A , эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2	Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3	Цезий	$3,2 \cdot 10^{-19}$	2,0
Платина	$10 \cdot 10^{-19}$	6,3	Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0
Рубидий	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1			

9. Массы и энергии покоя некоторых частиц

Частица	m_0		E_0	
	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	$1,50 \cdot 10^{-10}$	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
α -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный π -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

10. Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а. е. м.	Изотоп	Символ	Масса, а. е. м.
Нейтрон	n^1	1,00867	Бериллий	${}^7_4\text{Be}$ ${}^9_4\text{Be}$	7,01693 9,01219
Водород	${}^1_1\text{H}$ ${}^2_1\text{H}$ ${}^3_1\text{H}$	1,00783 2,01410 3,01605	Бор	${}^{10}_5\text{B}$ ${}^{11}_5\text{B}$	10,01294 11,00930
Гелий	${}^3_2\text{He}$ ${}^4_2\text{He}$	3,01603 4,00260	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$ ${}^{13}_6\text{C}$ ${}^{14}_6\text{C}$	12,00000 13,00335 14,00324
Литий	${}^6_3\text{Li}$ ${}^7_3\text{Li}$	6,01513 7,01601	Азот Кислород	${}^{14}_7\text{N}$ ${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{17}_8\text{O}$	14,00307 15,99491 16,99913

Учебное издание

ЮМАШЕВ Константин Владимирович
БОБУЧЕНКО Дмитрий Степанович
БУМАЙ Юрий Александрович и др.

**СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ
ЗАНЯТИЙ И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты»,
1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»,
1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника»,
1-38 02 01 «Информационно-измерительная техника и технологии»,
1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»,
1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»,
1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства»,
1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация»,
1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества
и диагностики состояния объектов»

В 2 частях

Часть 2

Редактор *Е. И. Бенищевич*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 23.08.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,52. Уч.-изд. л. 4,32. Тираж 100. Заказ 398.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

