

53(075)
У912

№4358 – 3



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



**Федерального государственного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ В Г. ТАГАНРОГЕ**

Кафедра физики

**Учебно-методическое пособие и
контрольные задания по физике**

Часть 3

Для студентов всех инженерных специальностей
факультета безотрывных форм обучения



Таганрог 2011

УДК 53(075.8)

Составители: Г.В. Арзуманян, Л.Е. Гатько, А.В. Третьякова,
В.А. Фатеева, Н.С. Чилингарова.

Учебно-методическое пособие и контрольные задания по физике. Ч.3. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. – 87 с.

В работе приводятся общие рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины «Физика» и решению задач по данной дисциплине, программа курса «Физика» на четвёртый семестр, основные законы и соотношения, примеры решения задач, а также условия задач для выполнения контрольных работ и список вопросов для самоконтроля.

Работа предназначена для студентов факультета БФО, обучающихся по всем инженерным специальностям.

Табл. 14. Илл. 23. Библиогр.: 14 назв.

Рецензент А.Б. Колпачёв, канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры физики ТТИ ЮФУ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вашему вниманию предлагается учебно-методическое пособие по курсу «Физика» для студентов факультета БФО, обучающихся по всем инженерным специальностям ТТИ ЮФУ.

Дисциплина «Физика» совместно с курсом «Высшая математика» составляют основу теоретической подготовки инженеров всех направлений и играет роль фундаментальной базы, без которой невозможна их дальнейшая успешная деятельность.

Основными целями дисциплины «Физика» являются:

- формирование у студентов естественнонаучного образа мышления;

- выработка умений и навыков по анализу реальных физических процессов.

Основными задачами курса «Физика» являются:

- обеспечение широкой теоретической подготовки студентов в области физики;

- получение студентами представлений об основных физических явлениях;

- усвоение студентами основных физических понятий и законов классической и современной физики, формирование представлений о границах применимости различных физических законов;

- изучение приемов и приобретение навыков решения конкретных задач, помогающих студентам в дальнейшем решать инженерные задачи;

- формирование умения оценить степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных и теоретических методов исследований;

- получение начальных навыков проведения экспериментальных исследований в процессе выполнения лабораторных работ, ознакомление студентов с современными измерительными приборами, а также выработка навыков анализа реальных физических процессов.

В пособии приводится программа дисциплины «Физика» на четвёртый семестр обучения, включающая следующие разделы: механические и электромагнитные волны, волновая и квантовая оптика, основы специальной теории относительности, элементы

квантовой механики и физика твёрдого тела, строение и свойства атомных ядер, радиоактивность и ядерные реакции.

В пособии также представлены в виде соотношений основные законы теоретического курса, условия задач для выполнения контрольных работ по данной дисциплине. Приводимые примеры решения задач облегчат освоение методики решения задач по соответствующей теме.

Авторы надеются, что данное методическое пособие поможет студентам в овладении основами данной дисциплины.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Изучение студентом-заочником курса «Физика» складывается из следующих видов работ: самостоятельное изучение теоретического материала по учебным пособиям, работа в контакте с преподавателем, решение задач, выполнение контрольных и лабораторных работ, сдача зачётов и экзаменов.

Самостоятельное изучение дисциплины «Физика» по учебным пособиям является основным видом работы студента-заочника. При этом нужно иметь в виду следующее.

1. Изучать курс «Физика» необходимо систематически в течение всего учебного процесса. Знакомство с материалом дисциплины в сжатые сроки (например, перед экзаменом) не даёт глубоких и прочных знаний.

2. В качестве учебных пособий можно использовать учебники и методические пособия, указанные в списке основной и дополнительной литературы.

3. При чтении учебного пособия желательно составлять краткий конспект, в котором сжато описываются основные физические явления, приводятся определения физических величин и единицы их измерения, записываются формулировки законов и выражающие эти законы математические соотношения (формулы), по возможности делаются пояснительные чертежи и решаются типовые задачи.

4. Самостоятельную работу по изучению курса «Физика» желательно контролировать с помощью ответов на вопросы, предназначенные для самоконтроля (с. 77).

Решение задач является необходимым условием успешного изучения курса «Физика». Решение задач помогает успешно усвоить

теоретический материал, понять смысл законов, закрепляет в памяти математические выражения законов, прививает умения и формирует навыки практического использования теоретических знаний. Следует отметить, что для решения задач по физике не существует универсального алгоритма. Тем не менее **рекомендуется придерживаться следующей схемы действий, которая зачастую помогает успешно решить задачу.**

1. Попытаться предельно четко понять условие задачи и образно представить себе соответствующий физический процесс.

2. **Выполнить рисунок или схему** (если это возможно), поясняющие содержание задачи; по возможности **указать все физические величины**, которые помогают понять физический процесс, описанный в задаче, и **которые могут быть пояснены на рисунке.**

3. Прежде чем начинать решать задачи, следует внимательно разобрать примеры решения задач по соответствующему разделу.

4. Записать после слова «Дано» все величины с числовыми значениями, которые используются при решении задачи, в том числе и величины, взятые из таблиц. Физические величины записываются в системе СИ с указанием их размерностей.

После слова «Найти» записать все величины или соотношения между ними, которые необходимо определить по условию задачи.

5. **Записать математические выражения законов**, которыми описываются процессы, указанные в задаче, и на которых базируется её решение. Привести **расшифровку всех буквенных обозначений**. Далее необходимо проанализировать полученные уравнения и попытаться мысленно представить себе последовательность действий по определению неизвестной величины.

6. Каждый этап решения задачи необходимо сопровождать **краткими и исчерпывающими пояснениями.**

7. Задачу необходимо решать **в общем виде**, т.е. выразить искомую величину в виде формулы, в которую входят величины, указанные после слова «Дано». Не допускается (за редкими исключениями) вычисление промежуточных величин. **Числовые значения** (без размерностей) **подставляются только в конечную формулу**, выражающую искомую неизвестную величину.

8. Произвести проверку размерности. Для этого подставить в

конечную формулу наименования единиц всех входящих в неё величин и убедиться в правильности наименования искомой величины.

9. Оценить правдоподобность числового ответа. Иногда такая оценка помогает своевременно обнаружить ошибочность полученного результата и устранить её. Например, диэлектрическая проницаемость среды не может быть меньше единицы, давление газа, его объём – величины только положительные и т.д.

Выполнение контрольной работы

В четвёртом семестре студенты выполняют две контрольные работы по следующим разделам:

– **Механические и электромагнитные волны. Волновая и квантовая оптика. Релятивистская механика (контрольная работа №5);**

– **Элементы атомной физики и квантовой механики (контрольная работа №6).**

При этом необходимо соблюдать следующие указания.

1. Контрольная работа выполняется только ***по условиям задач данного пособия***. Замена задач на другие, взятые из других изданий, не допускается.

2. Контрольная работа (***каждая!***) выполняется в обычной тетради в клетку (как правило, 18 с.), на обложку которой наклеивается ***специальный (по содержанию и форме) бланк***.

3. Контрольная работа выполняется ***шариковой ручкой черного или синего цвета***. На страницах тетради оставляются поля (2-3 см) для замечаний рецензента.

4. ***Оформление каждой задачи*** начинается с ***новой страницы***. Сначала без сокращений ***полностью переписывается условие задачи***. Далее выполняется её ***решение в соответствии с правилами***, изложенными ранее.

5. Если контрольная работа после рецензирования не была зачтена, студент ***обязан представить её на повторное рецензирование***. Повторная работа содержит те задачи, решения которых оказались неверными или к которым имелись существенные замечания. Она выполняется либо на свободных страницах тетради, где была выполнена незачтённая контрольная работа, либо в новой тетради. В последнем случае она представляется вместе с незачтённой работой. ***Правила оформления*** повторной работы ***не***

отличаются от правил оформления предыдущей работы. Не допускается делать исправления в том же месте, где были допущены ошибки.

6. Если контрольная работа зачтена, но содержит замечания или ошибки, то эти недостатки необходимо устранить до экзамена, на практических занятиях. *Зачтённые работы студенту не возвращаются.*

7. *Защита контрольной работы* проводится в виде беседы, в ходе которой *студент должен дать развернутое пояснение к любой задаче*, входящей в его контрольную работу.

8. Зачёт, выставленный по контрольной работе, действителен в течение *трёх учебных семестров*. Если за это время студент не сдал экзамен, то зачёт по контрольной работе аннулируется.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ НА ЧЕТВЁРТЫЙ СЕМЕСТР

Механические и электромагнитные волны

Волновые процессы. Частота волны, волновой вектор, фазовая скорость, фронт волны, волновая поверхность, продольные и поперечные волны, плоская и сферическая волна, уравнение волны, волновое уравнение. Принцип Гюйгенса. Законы преломления и отражения волн. Энергия и импульс, переносимые волной. Интенсивность волны.

Механические волны (упругие волны). Интерференция механических волн. Стоячая волна. Звуковые волны. Ультразвук.

Электромагнитные волны. Скорость распространения электромагнитных волн. Волновой пакет. Групповая скорость, дисперсия.

Волновая оптика

Волновая оптика. Интерференция света. Понятие временной и пространственной когерентности. Общие свойства интерференционной картины от двух щелевых когерентных источников. Опыт Юнга и другие опыты по наблюдению интерференции света. Интерференция в тонких плёнках. Полосы равной толщины и равного наклона. Использование интерференции в технике.

Дифракция света. Принцип Гюйгенса. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция на круглом отверстии и круглом экране. Зонная и фазовая пластинки. Ограничения возможностей оптических приборов.

Дифракция Фраунгофера на одной щели. Дифракционная решетка. Разрешающая способность, линейная и угловая дисперсии дифракционной решетки. Дифракция на пространственных структурах, дифракция рентгеновских лучей. Рентгеноструктурный анализ. Понятие о голографии.

Естественный и поляризованный свет. Поляризаторы. Закон Малюса. Поляризация при отражении и преломлении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Искусственное двойное лучепреломление. Дисперсия света. Объяснение дисперсии на основе классической электронной теории. Фазовая и групповая скорости. Связь между ними. Скорость переноса энергии. Спектральный анализ.

Квантовая оптика

Квантовая оптика. Тепловое излучение и его характеристики. Энергетический спектр излучения. Закон Кирхгофа. Гипотеза Планка. Формула Планка для излучательной способности абсолютно черного тела. Законы теплового излучения как следствия формулы Планка. Закон Релея – Джинса. Закон Стефана – Больцмана. Законы Вина.

Фотоны. Энергия, импульс, масса фотона. Опыт Боте. Тормозное рентгеновское излучение. Фотоэлектрический эффект. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Опыты Лебедева. Давление света. Эффект Комптона.

Основы специальной теории относительности

Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея. Границы применимости классической механики. Элементы теории относительности. Опыт Майкельсона – Морли. Постулаты теории относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца (релятивистское сокращение длины и промежутков времени, закон сложения скоростей). Элементы релятивистской динамики. Релятивистский импульс. Релятивистская энергия.

Основы квантовой механики

Опыты Резерфорда по рассеиванию альфа-частиц. Модель атома по Резерфорду. Спектры излучения атомов и их количественное описание. Модель атома Бора. Теория водородоподобного атома Бора. Опыт Франка и Герца.

Гипотеза де Бройля. Опыты по дифракции микрочастиц. Электронно-графический анализ. Дуализм волн и частиц. Волна де Бройля. Волновая функция. Физический смысл квадрата модуля волновой функции. Свойства волновой функции. Условие нормировки.

Соотношения неопределённостей. Применение соотношений неопределённостей к решению квантово-механических задач.

Принцип причинности в квантовой механике. Уравнение Шрёдингера. Стационарные состояния. Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний. Изображение физических величин операторами. Операторы координаты и импульса, кинетической и потенциальной энергий. Оператор момента импульса. Оператор Гамильтона для полной энергии.

Свободная частица в квантовой механике. Частица в потенциальном ящике (яме) с бесконечно высокими и вертикальными стенками. Энергетический спектр частиц в потенциальном ящике (яме). Квантовый гармонический осциллятор.

Потенциальный барьер. Поведение частицы вблизи потенциальных барьеров. Туннельный эффект. Прозрачность барьера. Холодная эмиссия электронов из металла.

Квантовая модель атома водорода и её сравнение с боровской моделью. Квантование энергии, момента импульса. Квантовые числа. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Тожественные частицы. Принцип Паули. Заполнение электронных состояний в атомах. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева.

Основы физики твёрдого тела. Элементы квантовой статистики

Элементы зонной теории кристаллов. Моно- и поликристаллы. Квантовая теория свободных электронов в металле. Распределение Ферми – Дирака. Распределение Бозе – Эйнштейна. Энергетические зоны в кристаллах. Динамика электронов в кристаллической решетке. Изоляторы, проводники и полупроводники. Свойства диэлектриков с точки зрения зонной теории. Сверхпроводимость. Высокотемпературная сверхпроводимость.

Строение и свойства атомных ядер.

Радиоактивность. Ядерные реакции

Состав ядра атома. Основные характеристики нуклонов и ядер. Изотопы. Понятие о ядерных силах. Масса и энергия связи в ядре. Средняя энергия нуклонов и её зависимость от массового числа. Неустойчивость тяжелых ядер по отношению к некоторым типам распада.

Сущность явления радиоактивности. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Типы радиоактивного распада. Основные характеристики α -, β - и γ -распадов. Понятие о ядерных реакциях. Законы сохранения в ядерных реакциях. Деление тяжелых ядер. Понятие об элементарных частицах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основной

1. Уколов А.С. Лекции по общему курсу физики. Ч.V. Электромагнитное поле. Колебания и волны: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 129 с.
2. Заичкин Н.Н. Лекции по общему курсу физики. Ч.VI. Оптика: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 137 с.
3. Заичкин Н.Н. Лекции по общему курсу физики. Ч.VII. Атомная физика. Квантовая механика. Физика твёрдого тела: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 132 с.
4. Гатько Л.Е., Матвеев А.И., Пасичный Ю.П. Методическое пособие к решению задач по курсу общей физики в системе РИТМ. Ч.2. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 164 с.
5. Доценко И.Б., Нестюрина Е.Е., Ретивов Н.А. Методическое пособие к решению задач по курсу общей физики в системе РИТМ. Ч.3. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 99 с.
6. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т.– СПб.: Лань, 2007. Т.1. – 432 с.
7. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т.– СПб.: Лань, 2007. Т.2. – 496 с.
8. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т.– СПб.: Лань, 2008. Т.3. – 317 с.
9. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2000. – 542 с.
10. Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2000. – 720 с.
11. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1997. – 544 с.
12. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1990. – 400 с.

Дополнительный

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения с ответами и решениями. – М.: Мир, 1978. – 624 с.
2. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 304 с.
3. Фирганг Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. – М.: Высшая школа, 1978. – 352 с.

**РАЗДЕЛ 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ВОЛНЫ. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА.
РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА**

5.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И СООТНОШЕНИЯ

Механические и электромагнитные волны

1. Общий вид волнового уравнения:

$$\Delta \vec{\xi} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2},$$

где v – фазовая скорость распространения волны;

$\xi(\mathbf{r}, t) = f(\omega t - \mathbf{k} \cdot \vec{r}) + \varphi_0$ – произвольная функция (уравнение волны);

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

В случае механических волн $\xi(\mathbf{r}, t) = S(\mathbf{r}, t)$, а в случае электромагнитных волн $\vec{\xi}(\mathbf{r}, t) = \vec{E}(\mathbf{r}, t)$ и $\vec{\xi}(\mathbf{r}, t) = \vec{H}(\mathbf{r}, t)$. Здесь $S(\mathbf{r}, t)$ – смещение точек среды, определяемое радиусом-вектором \vec{r} в момент времени t ; $\vec{E}(\mathbf{r}, t)$ – напряженность электрического поля; $\vec{H}(\mathbf{r}, t)$ – напряженность магнитного поля.

2. Фазовые скорости различных волн в однородных и изотропных средах:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \text{ – продольная волна в идеальном газе;}$$

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \text{ – продольная волна в жидкости;}$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ – продольная волна в твёрдой среде;}$$

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \text{ – поперечная волна в твёрдой среде;}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n} \text{ – электромагнитная волна.}$$

Здесь γ – показатель адиабаты газа; p – давление газа; ρ – плотность среды; K – модуль всестороннего сжатия (объёмной упругости); E – модуль Юнга; G – модуль сдвига; ϵ и μ – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; ϵ_0 и μ_0 –

соответственно электрическая и магнитная постоянные.

3. Уравнение плоской гармонической волны, распространяющейся в однородной изотропной среде без поглощения:

$$\xi(\mathbf{r}, t) = A \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_0),$$

где A – амплитуда волны; $\omega = 2\pi/T$ – циклическая частота колебаний; T – период колебаний; $\vec{k} = k\vec{n} = \frac{\omega}{v}\vec{n}$ – волновой вектор;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число (пространственная частота); $\lambda = vT$ – длина волны; \vec{n} – единичный вектор нормали к фронту волны (волновой поверхности); \vec{r} – радиус-вектор рассматриваемой точки пространства; $\varphi = \omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_0$ – фаза волны.

4. Уравнение сферической гармонической волны, распространяющейся в однородной изотропной среде без поглощения:

$$\xi(r, t) = \frac{a_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0),$$

где $\xi(r, t)$ – смещение точек среды на расстоянии r от источника волны в момент времени t ; $a_0 = A(r_0)$; $A(r_0)$ – амплитуда волны на расстоянии r_0 от источника.

5. Условия максимумов и минимумов амплитуды при интерференции механических волн от двух когерентных источников:

$$\text{max} - \delta = \pm 2m\pi, \Delta = \pm m\lambda, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots;$$

$$\text{min} - \delta = \pm (2m+1)\pi, \Delta = \pm (2m+1)\lambda/2, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots,$$

где $\delta = k\Delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$ – разность фаз волн; Δ – разность хода волн от двух источников к рассматриваемой точке; k – волновое число; λ – длина волны.

6. Фаза волны при её отражении от границы раздела двух сред.

При отражении волны от менее плотной среды её фаза не меняется (рис. 5.1,а), а при отражении от более плотной среды её фаза изменяется на π (рис. 5.1,б).

7. Уравнение стоячей волны.

$$\text{a) } \xi = \xi_1 + \xi_2 = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx) = 2A \cos kx \cos \omega t,$$

где $2A \cos kx = A_{cm}$ – амплитуда стоячей волны при отражении её от менее плотной среды.

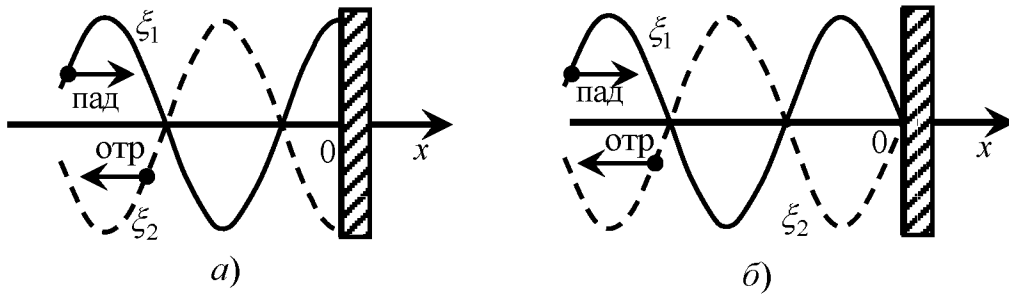


Рис. 5.1

$$\begin{aligned} \text{б) } \xi &= \xi_1 + \xi_2 = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx + \pi) \\ &= 2A \cos\left(kx + \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned}$$

где $2A \cos\left(kx + \frac{\pi}{2}\right) = A_{cm}$ – амплитуда стоячей волны при её отражении от более плотной среды.

8. Координаты пучностей ($x_{пучн}$) и узлов ($x_{узн}$) стоячей волны (см. пункт 7):

$$\text{а) } x_{узн} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots,$$

$$x_{пучн} = \pm m \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots;$$

$$\text{б) } x_{узн} = \pm m \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots,$$

$$x_{пучн} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

9. Длина стоячей волны:

$$\lambda_{cm} = (n + 1) \frac{\lambda}{2} - m \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}.$$

10. Плотность потока энергии, переносимой волной:

$$j = \frac{d\Phi}{dS_{\perp}} = \frac{dW}{dS_{\perp} dt} = \Omega v,$$

где $\Phi = \frac{dW}{dt}$ – поток энергии, переносимой волной через произвольную поверхность за единицу времени; dS_{\perp} – элемент поверхности, перпендикулярной скорости распространения волны; W – энергия, переносимая волной; Ω – объёмная плотность энергии (в случае

механических волн $\Omega = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \left(\omega t - kx + \varphi_0 \right)$, в случае электромагнитных волн $\Omega = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2 = \sqrt{\varepsilon \mu \varepsilon_0 \mu_0} EH = \frac{EH}{v}$; v – скорость распространения волны; ρ – плотность среды.

11. Интенсивность волны:

$$\langle j \rangle = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 |\vec{v}| \sim A^2 \text{ – механической;}$$

$$\langle j \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} E_m^2 \sim E_m^2 \text{ – электромагнитной.}$$

Законы распространения световых волн

1. Частота световой волны при её преломлении и отражении.

При переходе через границу раздела либо при отражении от неё частота электромагнитных волн (ЭМВ) не изменяется.

2. Закон отражения света.

а) *Падающий, отражённый и преломлённый лучи лежат в одной плоскости.*

б) *Угол падения луча равен углу его отражения.*

3. Закон преломления света.

Отношение синуса угла падения луча к синусу угла его преломления равно отношению показателю преломления n_{21} двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}; \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления сред, в которых расположены соответственно падающий и преломлённый лучи; v_1 и v_2 – скорости распространения света в первой и во второй средах соответственно; λ – длина световой волны; n_{21} – относительный показатель преломления.

4. Фаза световой волны при её преломлении и отражении.

При отражении от оптически менее плотной среды фаза отражённой волны не меняется.

При отражении от оптически более плотной среды фаза отражённой волны изменяется на π .

5. Амплитуды отражённой (E_{10}) и прошедшей (E_{20}) волн:

$$E_{10} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_{00}; \quad E_{20} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_{00},$$

где E_{00} – амплитуда падающей волны; n_1 и n_2 – показатели преломления сред.

Интерференция световых волн

1. Оптическая длина пути световой волны:

$$L = nl,$$

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

2. Показатель преломления среды (абсолютный):

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

где c – скорость света в вакууме; v – скорость света в среде.

3. Оптическая разность хода двух световых волн:

$$\Delta = |L_1 - L_2|.$$

4. Разность фаз двух когерентных световых волн:

$$\delta = k\Delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda},$$

где k – волновое число; λ – длина волны; Δ – оптическая разность хода волн.

5. Условия максимумов (*max*) и минимумов (*min*) интенсивности света при интерференции световых волн от двух когерентных источников:

$$\text{max} - \delta = k\Delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} = \pm 2m\pi, \quad \Delta = \pm m\lambda, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots;$$

$$\text{min} - \delta = \pm(2m+1)\pi, \quad \Delta = \pm(2m+1)\lambda/2, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

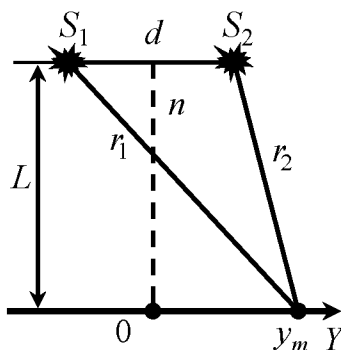


Рис. 5.2

6. Оптическая разность хода двух волн в произвольной точке y_m на экране, расположенном параллельно двум когерентным щелевым источникам света [например, в опыте Юнга (рис.5.2)]:

$$\Delta = \frac{d}{L} y_m,$$

где d – расстояние между источниками; L – расстояние от источников до экрана.

7. Ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними *max* или *min*) на экране в опыте Юнга:

$$h = \frac{L}{d} \lambda.$$

8. Распределение интенсивности света на экране в опыте Юнга (рис.5.3):

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{h} y_m \right) \right],$$

где I_0 – интенсивность одного источника;
 $y_m = \frac{L}{d} \delta$; h – ширина интерференционной полосы.

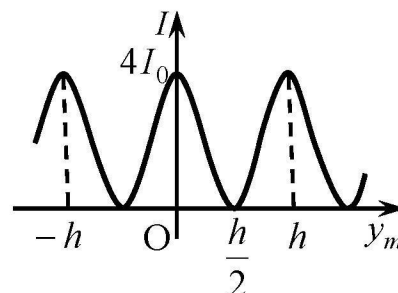


Рис. 5.3

9. Оптическая разность хода световых волн при их интерференции в тонких плёнках в отражённом и проходящем свете без учёта потери полуволны при отражении от оптически более плотной среды (на рис. 5.4 показан ход лучей в плёнках):

$$\Delta' = |L_1 - L_2| = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha},$$

где d – толщина плёнки; n_2 – показатель преломления плёнки; α – угол падения луча; n_1 и n_3 – показатель преломления сред, в которых расположена плёнка.

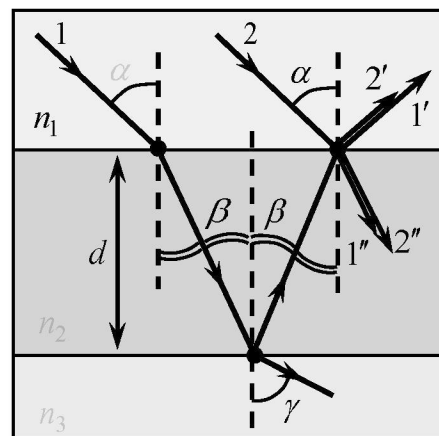


Рис. 5.4

10. Радиусы колец Ньютона (светлых и темных) при наблюдении интерференции в монохроматическом свете (рис. 5.5):

$$r_m = \sqrt{(m-1)R} \frac{\lambda}{2n_2} \text{ – светлые кольца в}$$

отражённом свете или темные в проходящем свете;

$$r_m = \sqrt{mR} \frac{\lambda}{n_2} \text{ – темные кольца в отра-}$$

жённом свете и светлые в проходящем свете.

Здесь R – радиус кривизны линзы; $m = 1, 2, 3, \dots$ – номер интер-

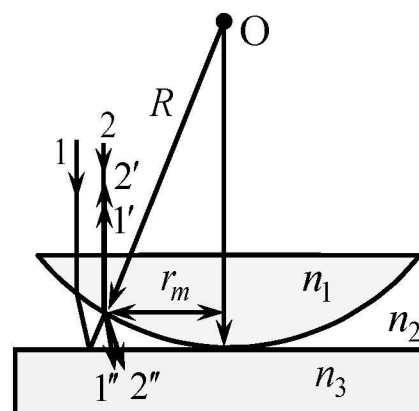


Рис. 5.5

ференционного кольца; n_2 – показатель преломления среды между линзой и пластинкой.

Дифракция световых волн

1. Дифракция Фраунгофера – дифракция в параллельных лучах.
2. Дифракция Френеля – дифракция в сходящихся лучах.
3. Аналитическое выражение принципа Гюйгенса – Френеля (рис.5.6.):

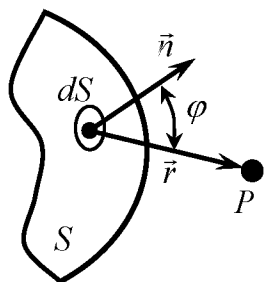


Рис. 5.6

$$E_p = \int_S dE_p = \int_S K(\varphi) \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - \langle \vec{k}, \vec{r} \rangle + \alpha),$$

где E_p – напряженность поля в точке P ; S – площадь открытой части фронта волны; \vec{r} – радиус-вектор, проведённый от элемента фронта волны dS в точку наблюдения P ; \vec{n} – вектор нормали к элементу фронта волны dS ; $K(\varphi)$ – коэффициент, учитывающий расположение точки наблюдения ($0 \leq K(\varphi) \leq 1$); $K(\varphi) = 0$ при $\varphi \geq \pi/2$; $K(\varphi) = 1$ при $\varphi = 0$.

4. Зоны Френеля.

4.1. Метод зон Френеля – волновая поверхность (ВП) разбивается на кольцевые зоны, построенные так, что расстояния от краев каждой зоны до точки P отличаются на $\lambda/2$ (λ – длина волны в той среде, в которой распространяется волна) (рис. 5.7.).

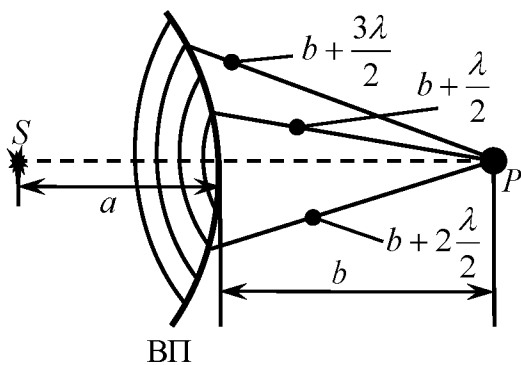


Рис. 5.7

4.2. Амплитуда волны в точке P (точка наблюдения):

$$A_p = A_1 - A_2 + A_3 - \dots,$$

где A_1, A_2, A_3, \dots – результирующая амплитуда волн, приходящих в точку наблюдения P соответственно от

первой, второй и т.д. зон Френеля; $A_1 > A_2 > A_3 \dots > A_m > \dots$.

4.3. Условия максимумов и минимумов интенсивности в точке наблюдения P (см. рис. 5.7):

$$A_{\max} = \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}, \text{ если } m \text{ нечётное;}$$

$$A_{\min} = \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}, \text{ если } m \text{ чётное,}$$

где m – число открытых зон Френеля.

4.4. Радиус внешней границы r_m m -й зоны Френеля (см. рис. 5.7):

$$r_m = \sqrt{\frac{abm\lambda}{a+b}}.$$

5. Условия максимумов и минимумов интенсивности света на экране при дифракции Фраунгофера на щели (свет падает перпендикулярно):

главный *max*: $\varphi = 0$;

локальные *max*: $a \sin \varphi = \pm (m+1) \frac{\lambda}{2}$, $m = 1, 2, \dots$;

min: $a \sin \varphi = \pm m\lambda$, $m = 1, 2, \dots$,

где a – ширина щели; m – номер максимума; φ – угол дифракции (угол между нормалью к поверхности щели и направлением на m -й *max* или *min*).

6. Распределение интенсивности света I_φ в различных точках экрана при дифракции Фраунгофера на щели (рис. 5.8):

$$I_\varphi = I_0 \left(\frac{\sin U}{U} \right)^2,$$

где $U = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi$.

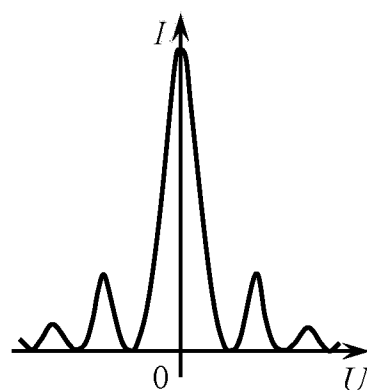


Рис. 5.8

7. Условия главных максимумов интенсивности света при дифракции света на дифракционной решетке (дифракция Фраунгофера):

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

где $d = a + b$ – постоянная (период) дифракционной решетки; m – номер главного максимума; φ – угол дифракции; a – ширина щели; b – межщелевое расстояние.

8. Условия главных и дополнительных минимумов интенсивности света при его дифракции на дифракционной решетке (дифракция Фраунгофера):

главные *min*: $a \sin \varphi = \pm m\lambda$, $m = 1, 2, \dots$;

дополнительные *min*:

$$d \sin \varphi = \frac{m'}{N} \lambda, \quad m' = 1, 2, \dots, N-1, N+1, N+2, \dots,$$

где N – число щелей в дифракционной решетке.

9. Разрешающая способность спектрального прибора (дифракционной решетки):

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN,$$

где $\delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \delta\lambda$), которые могут наблюдаться отдельно в спектре m -го порядка, полученном посредством данной решетки; N – общее число щелей решетки.

10. Условие дифракционных максимумов при дифракции рентгеновских лучей (рис. 5.9) (формула Вульфа – Брэгга):

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

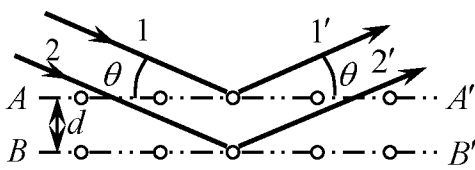


Рис. 5.9

где d – расстояние между двумя соседними атомными плоскостями AA' и BB' кристалла (межплоскостное расстояние); θ – угол скольжения рентгеновского излучения, а λ – их длина.

Поляризация

1. Закон Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha,$$

где I_2 и I_1 – интенсивности плоскополяризованного света, прошедшего через поляризатор и падающего на поляризатор соответственно; α – угол между направлением колебаний светового вектора падающей волны и плоскостью пропускания поляризатора.

В случае падения на поляризатор естественного света с интенсивностью I_0 на выходе из него получим плоскополяризованную световую волну интенсивностью $I_1 = 0,5I_0$.

2. Закон Брюстера (рис. 5.10):

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

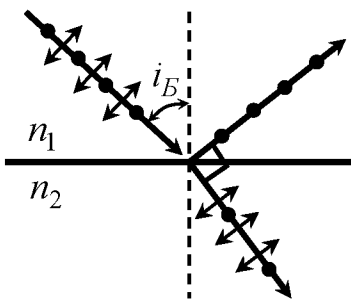


Рис. 5.10

где i_B – угол падения естественного света, при котором отражённая от границы раздела диэлектриков световая волна плоскополяризована, при этом проходящая (преломлённая) световая волна поляризована лишь частично;

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

3. Угол поворота плоскости поляризации монохроматического

света:

– для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha d;$$

– для оптически активных растворов (например, сахарный раствор)

$$\varphi = |\alpha|Cd.$$

Здесь α ($|\alpha|$) – удельное вращение; d – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе; C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

4. Степень поляризованности световой волны:

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

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

5. Показатель преломления обыкновенного (o) и необыкновенного (e) лучей при двойном лучепреломлении в одноосном кристалле (рис. 5.11):

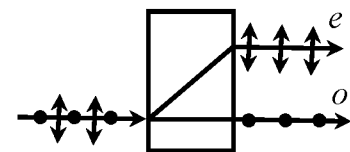


Рис. 5.11

$$n_o = \frac{c}{v_o}; \quad n_e = \frac{c}{v_e},$$

где c – скорость света в вакууме; v_o и v_e – соответственно скорости обыкновенного и необыкновенного лучей.

Тепловое излучение

1. *Спектральная плотность излучения* – средняя энергия E единицы объёма электромагнитного поля, приходящаяся на частоты в интервале от ν до $\nu + d\nu$ (или длины волн в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$):

$$w_\nu = \frac{1}{V} \frac{dE}{d\nu}; \quad w_\lambda = \frac{1}{V} \frac{dE}{d\lambda}.$$

2. *Излучательная способность тела (спектральная плотность потока излучения)* – энергия, излучаемая в единицу времени с единицы площади S поверхности тела в малом интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ (или длины волн от λ до $\lambda + d\lambda$):

$$r_{\nu,T} = \frac{1}{dSdt} \frac{dE}{d\nu}; \quad r_{\lambda,T} = \frac{1}{dSdt} \frac{dE}{d\lambda}; \quad r_{\nu,T} = \frac{\lambda^2}{c} r_{\lambda,T}.$$

3. *Интегральная энергетическая светимость (энергетическая*

светимость) – суммарная энергия, излучаемая в единицу времени с единицы площади поверхности тела по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π):

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu, \quad dR_T = r_{\nu,T} d\nu;$$

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda, \quad dR_T = r_{\lambda,T} d\lambda.$$

4. *Поглощательная способность тела* – отношение энергии, поглощаемой телом в малом интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, к падающей на тело энергии в том же интервале частот:

$$a_{\nu,T} = \frac{dE_{\text{пол}}}{dE_{\text{пад}}}.$$

5. *Серое тело* – тело, поглощательная способность которого не зависит от частоты (длины волны) излучения: $a_{\nu,T} = a_T = \text{const}$.

6. *Абсолютно чёрное тело* – тело, поглощающее всю энергию, падающую на его поверхность: $a_{\nu,T} = a_{\nu,T}^* = 1$.

7. *Закон Кирхгофа* – в состоянии теплового равновесия отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а определяется только его температурой и частотой (длиной волны) излучения:

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = f(\nu, T) \stackrel{\text{def}}{=} r_{\nu,T}^*; \quad \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = \varphi(\lambda, T) \stackrel{\text{def}}{=} r_{\lambda,T}^*,$$

где $f(\nu, T)$ и $\varphi(\lambda, T)$ – универсальные функции Кирхгофа; $r_{\nu,T}^*$ и $r_{\lambda,T}^*$ – спектральные плотности энергетической светимости.

8. *Закон Стефана – Больцмана для серого тела*:

$$R_T = a_T R_T^* = a_T \sigma T^4,$$

где R_T^* – энергетическая светимость абсолютно чёрного тела; T – абсолютная температура; σ – постоянная Стефана – Больцмана.

9 *Законы Вина для абсолютно чёрного тела*.

9.1. *Первый закон Вина (закон смещения Вина)*:

$$\lambda_m T = b_1,$$

где λ_m – длина волны, на которую приходится максимум спектраль-

ной плотности энергетической светимости (рис. 5.12); b_1 – постоянная закона смещения Вина ($b_1 = 2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К);

9.2. Второй закон Вина (рис. 5.12):

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = b_2 T^5,$$

где $(r_{\lambda,T})_{\max}$ – значение спектральной плотности энергетической светимости при $\lambda = \lambda_m$; $b_2 = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5}$ – постоянная второго закона Вина.

10. Формула Планка:

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1},$$

где h – постоянная Планка; ν – частота излучения; c – скорость света в вакууме; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

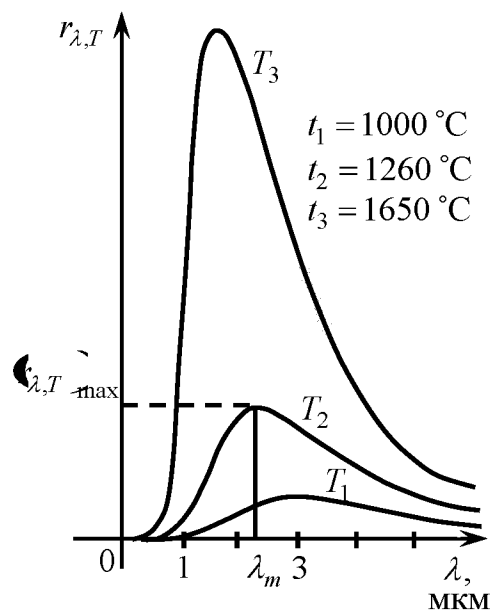


Рис. 5.12

Квантовая природа света

1. Энергия фотона (кванта излучения):

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}.$$

2. Импульс фотона:

$$p_\phi = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

3. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + T_{\text{max}} = A + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2},$$

где $h\nu$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из металла; $T_{\text{max}} = \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов; m – масса электрона; ν_{max} – максимальная скорость фотоэлектронов.

4. Красная граница фотоэффекта:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{вых}}},$$

где λ_0 – максимальная длина волны света, при которой еще возможен

фотоэффект.

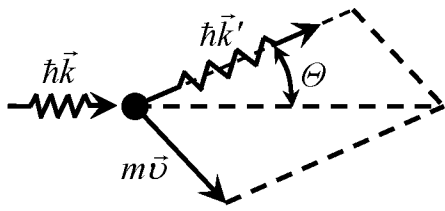


Рис. 5.13

5. Формула Комптона (рис. 5.13):

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0c} \left(-\cos\Theta \right) \approx 2 \frac{h}{m_0c} \sin^2 \frac{\Theta}{2},$$

где λ_1 – длина волны падающего на фольгу рентгеновского излучения; λ_2 – длина волны фотона, рассеянного на угол Θ

после взаимодействия с электроном; m_0 – масса покоя электрона;

$$\frac{h}{m_0c} = \lambda_c = 0,24 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

6. Давление света при падении на поверхность:

$$P = (1 + \rho) \frac{W}{cS\Delta t} \cos\alpha = (1 + \rho) \frac{E}{c} \cos\alpha,$$

где ρ – коэффициент отражения света поверхностью; W – энергия фотонов, падающих на поверхность площадью S за время Δt ; c – скорость света; α – угол падения света; E – освещённость поверхности.

Основы релятивистской механики

В специальной теории относительности (СТО) рассматриваются только инерциальные системы отсчета. Во всех предлагаемых Вам задачах считается, что оси y, y' и z, z' сонаправлены (рис. 5.14), а относительная скорость U системы координат K' относительно системы K направлена вдоль общей оси x, x' .

1. Частные преобразования Лоренца (рис. 5.14):

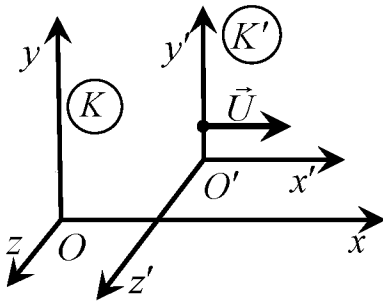


Рис. 5.14

$$\begin{cases} x = \frac{x' + Ut'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + \frac{U}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x' = \frac{x - Ut}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \frac{t - \frac{U}{c^2} x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{cases}$$

где c – скорость света в вакууме; β – скорость частицы, выраженная в долях скорости света.

2. Релятивистское (лоренцево) сокращение расстояния между двумя точками пространства (длины стержня):

$$\begin{cases} l_x = l_{0x} \sqrt{1 - \left(\frac{U}{c}\right)^2} = l_{0x} \sqrt{1 - \beta^2}; \\ l_y = l_{0y}; \\ l_z = l_{0z}, \end{cases}$$

где l_{0x}, l_{0y}, l_{0z} – длины проекций стержня в системе K' , относительно которой он покоится; l_x, l_y, l_z – длины проекций стержня в системе K ; U – скорость стержня (системы K') относительно системы K .

3. Релятивистское замедление хода часов:

$$\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - \left(\frac{U}{c}\right)^2} = \tau_0 / \sqrt{1 - \beta^2},$$

где τ_0 – интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной точке системы K' , измеренный по часам этой системы (собственное время движущихся часов); τ – интервал времени между этими двумя событиями, измеренный по часам системы K .

4. Релятивистский закон сложения скоростей:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{v'_x + U}{1 + \frac{v'_x U}{c^2}}; \quad v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{v'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x U}{c^2}}; \quad v_z = \frac{dz}{dt} = \frac{v'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x U}{c^2}}.$$

5. Второй закон Ньютона (релятивистский импульс):

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) = \frac{d(m\vec{v})}{dt},$$

где $\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} = m\vec{v}$ – релятивистский импульс частицы;

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ – релятивистская масса; m_0 и v – масса покоя и скорость частицы; β – скорость частицы, выраженная в долях скорости света.

6. Взаимосвязь массы и энергии релятивистской частицы:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где E – полная энергия релятивистской частицы; $E_0 = m_0c^2$ – энергия покоя (когда $v = 0$) частицы.

Частицу следует считать релятивистской, если её кинетическая энергия T по порядку величины сравнима или превышает её энергию покоя E_0 .

7. Полная энергия свободной частицы:

$$E = E_0 + T,$$

где T – кинетическая энергия релятивистской частицы.

8. Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы:

$$E^2 = E_0^2 + \hbar c \vec{p}^2.$$

5.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Источник АВ плоской гармонической волны колеблется с частотой ν и находится на расстоянии l от стены, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны (рис. 5.15). Принимая за начало координат оси Ox координату источника, а за направление оси – направление распространения волны от источника, определить уравнение стоячей волны, возникающей в результате сложения бегущей и отражённой от стены волн. Скорость распространения волны принять равной ν .

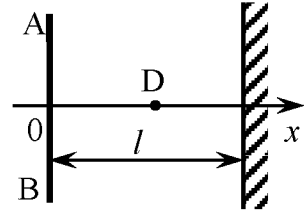


Рис. 5.15

Дано: ν, l, ν .

Найти: $\xi(x, t)$.

Решение. Примем начальную фазу в уравнении бегущей волны равной нулю, тогда это уравнение имеет вид

$$\xi_1(x, t) = A \sin(\omega t - kx), \quad (1)$$

где A – амплитуда волны; $\omega = 2\pi/T$ – циклическая частота колебаний; T – период колебаний; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; $\lambda = \nu T$ – длина волны; $\varphi = \omega t - kx$ – фаза бегущей волны в произвольной точке **D** с координатой x ($0 \leq x \leq l$).

Фаза отражённой волны в точке **D** с координатой x ($0 \leq x \leq l$) имеет вид

$$\varphi' = \omega t - k[l + 2(l - x)] + \pi = \omega t + k[l - 2l] + \pi. \quad (2)$$

В уравнении (2) мы учли следующее:

- а) волна дважды проходит расстояние $l - x$ (туда и обратно);
- б) при отражении от стены волна изменяет свою фазу на π .

С учётом соотношения (2) уравнение отражённой волны имеет вид

$$\xi_2(x, t) = A \sin(\omega t + k[l - 2l] + \pi) = -A \sin(\omega t + k[l - 2l]). \quad (3)$$

Сложив уравнения (1) и (3), найдём уравнение искомой стоячей волны:

$$\xi(x, t) = \xi_1(x, t) + \xi_2(x, t) = A \sin(\omega t - kx) - A \sin(\omega t + k[l - 2l]).$$

Далее, воспользовавшись формулой разности синусов, окончательно получим:

$$\xi(x, t) = 2A \cos k(l - x) \sin(\omega t - kl) = A_{cm} \sin\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi\nu}{\nu} l\right),$$

где $A_{cm} = 2A \cos k(l - x)$ – амплитуда стоячей волны.

Задача 2. В опыте Юнга на пути одного из лучей поместили перпендикулярно ему стеклянную пластинку толщиной l , после чего интерференционная картина на экране сместилась на N полос. Длина волны монохроматического света λ . Определить показатель преломления n пластинки.

Дано: l, λ, N .

Найти: n .

Решение. Без пластинки оптическая разность хода лучей в нулевом максимуме:

$$\Delta = L_2 - L_1 = 0.$$

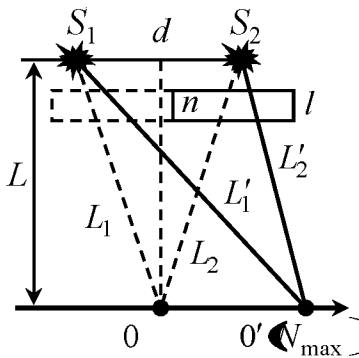


Рис. 5.16

Стеклянная пластинка вносит дополнительную разность хода лучей, которая приводит к смещению интерференционной картины на N полос (рис. 5.16). Так как $L \gg d$, можно считать лучи, идущие от источника S_2 , перпендикулярными пластинке. Поэтому оптическая разность хода лучей равна:

$$\Delta = (L'_2 - l + nl) - L'_1 = (n - 1)l = N\lambda.$$

Отсюда

$$n = \frac{N\lambda}{l} + 1.$$

Задача 3. На толстую стеклянную пластинку с показателем преломления $n_3 = 1,5$, покрытую тонкой плёнкой, показатель преломления которой $n_2 = 1,4$, падает параллельный пучок монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм) под углом $\alpha = 30^\circ$ (рис. 5.17). При какой толщине d плёнки отражённый свет вследствие интерференции будет максимально ослаблен.

Дано: $n_1 = 1; n_3 = 1,5; n_2 = 1,4; \lambda = 0,5$ мкм; $\alpha = 30^\circ$.

Найти: d .

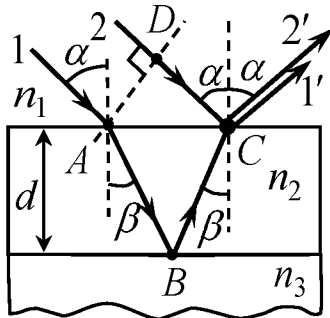


Рис. 5.17

Решение. В точках B и C световой пучок частично отражается от границы сред и частично преломляется. Образованные при отражении лучи $1'$ и $2'$ являются когерентными и интерферируют. Условие максимального ослабления света при интерференции состоит в том, что оптическая разность хода Δ этих лучей должна быть равна нечетному числу длин

полуволн:

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

где λ – длина волны света; $m = 0, 1, 2, \dots$

Как видно из рис. 5.17, оптическая разность хода лучей без учёта изменения фазы волны при отражении от оптически более плотной среды равна:

$$\Delta' = \overline{AB} + BC \vec{n}_2 - \overline{CD} \vec{n}_1. \quad (2)$$

В теоретическом курсе доказывается, что уравнение (2) представимо в виде

$$\Delta' = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}. \quad (3)$$

Поскольку $n_1 < n_2 < n_3$, то в точке C и в точке B происходит отражение от оптически более плотной среды. В этом случае фаза колебания световой волны изменяется на π и для луча 1, и для луча 2. Поэтому результат интерференции этих лучей будет такой же, как если бы изменения фазы не было вообще. В этом случае $\Delta' = \Delta$. Итак, условие минимума интерференции с учётом уравнений (1) и

$$(3) \text{ принимает вид } 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} = (m + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

$$\text{Отсюда толщина плёнки } d = \frac{(m + 1) \frac{\lambda}{2}}{4 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}.$$

Подставляя числовые значения в последнее соотношение, получим:

$$d_m \approx (2m + 1) 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Полагая $m = 0, 1, 2, \dots$, получим ряд возможных значений толщины плёнки:

$$d_0 \approx 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м, } d_1 \approx 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м и т. д.}$$

Задача 4. Постоянная дифракционной решетки в n раз ($n = 4$) больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на её поверхность. Определить угол между первыми симметричными главными максимумами (рис. 5.18).

Дано: $d = n\lambda$, $n = 4$, $m = \pm 1$.

Найти: α .

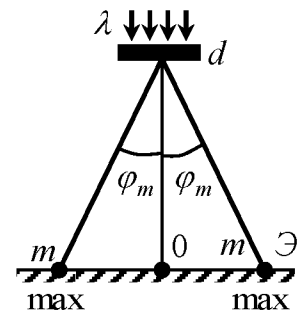


Рис. 5.18

Решение. Постоянная d дифракционной решетки, длина световой волны λ и угол φ_m отклонения лучей, соответствующий m -му максимуму, связаны соотношением

$$d \sin \varphi_m = m\lambda, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Главные максимумы 1-го порядка соответствуют значению $m = \pm 1$. Таких максимумов два, они расположены симметрично, справа и слева от центрального максимума, соответствующего $m = 0$ (см. рис. 5.18). Угол, под которым виден максимум первого порядка, находится из соотношения (1):

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d}\right). \quad (2)$$

Из уравнения (2) с учётом что $d = n\lambda$ искомый угол между двумя первыми симметричными главными максимумами будет равен:

$$\alpha = 2\varphi_1 = 2 \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d}\right) = 2 \arcsin\left(\frac{m}{n}\right). \quad (3)$$

Подставляя в (3) числовые данные, получим:

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{1}{4}\right) = 2 \arcsin 0,25 \approx 29^\circ.$$

Задача 5. Естественный свет последовательно проходит через три поляризатора, плоскости пропускания которых образуют между собой углы $\alpha_{12} = 45^\circ$ и $\alpha_{23} = 30^\circ$. Полагая, что коэффициент поглощения каждого поляризатора $k = 0,15$, найти, во сколько раз луч, выходящий из третьего поляризатора, ослаблен по сравнению с лучом, падающим на первый из них. Потери на отражение не учитывать.

Дано: $\alpha_{12} = 45^\circ$, $\alpha_{23} = 30^\circ$, $k_1 = k_2 = k_3 = k = 0,15$.

Найти: $m = \frac{I_0}{I_3}$.

Решение. Интенсивность света, вышедшего из первого поляризатора, будет равна (рис. 5.19):

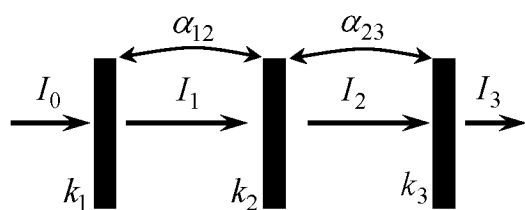


Рис. 5.19

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

где I_0 – интенсивность естественного света, падающего на первый поляризатор; $(1 - k)$ – доля света, прошедшего поляризатор с учётом поглощения.

Интенсивность света, прошедшего через второй поляризатор, определяется по закону Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha_{12}, \quad (2)$$

где α_{12} – угол между плоскостью колебаний светового вектора луча с интенсивностью I_1 и плоскостью пропускания второго поляризатора.

Для интенсивности света, прошедшего через третий поляризатор, имеем:

$$I_3 = I_2 \cos^2 \alpha_{23}. \quad (3)$$

Далее, подставляя в (3) выражения (1) и (2), получим:

$$I_3 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha_{12} \cos^2 \alpha_{23}. \quad (4)$$

Отсюда ослабление интенсивности луча, прошедшего систему из трёх поляризаторов, определится следующим образом:

$$m = \frac{I_0}{I_3} = \left[\frac{1}{2} \cos^2 \alpha_{12} \cos^2 \alpha_{23} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Подставляя числовые данные в уравнение (5), получим: $m \approx 8,3$.

Задача 6. Максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца соответствует длине волны $\lambda_m = 0,5$ мкм. Считая Солнце абсолютно чёрным телом, определить энергетическую светимость Солнца R_T^* и мощность излучения (световой поток) Солнца Φ .

Дано: $\lambda_m = 0,5$ мкм.

Найти: R_T^* , Φ .

Решение. Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела выражается формулой Стефана – Больцмана:

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

Температура излучающей поверхности может быть определена согласно первому закону Вина (закону смещения Вина):

$$\lambda_m T = b_1. \quad (2)$$

Выразив из (2) температуру и подставив её в (1), получим:

$$R_T^* = \sigma \left(\frac{b_1}{\lambda_m} \right)^4. \quad (3)$$

Мощность Φ , излучаемая Солнцем, равна произведению энергетической светимости R_T^* Солнца на площадь S его

поверхности $S = 4\pi R^2$;

$$\Phi = R_T^* S = R_T^* 4\pi R^2, \quad (4)$$

где R – радиус Солнца ($R = 6,95 \cdot 10^8$ м).

С учётом выражения (3) соотношение (4) принимает окончательный вид:

$$\Phi = R_T^* S = 4\pi R^2 \sigma \left(\frac{b_1}{\lambda_m} \right). \quad (5)$$

Подставив в формулы (3) и (5) числовые значения, получим:

$$R_T^* = 64 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}, \quad \Phi = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Задача 7. Рентгеновский фотон с энергией $\varepsilon_1 = 1,02$ МэВ был рассеян на свободном электроне (эффект Комптона) на угол $\Theta = 150^\circ$ (рис 5.20). Определить энергию ε_2 рассеянного фотона и импульс электрона отдачи.

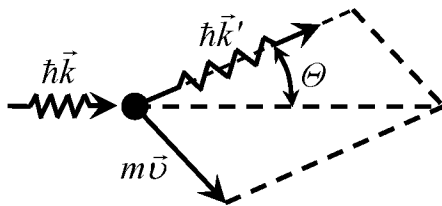


Рис. 5.20

Дано: $\varepsilon_1 = 1,02$ МэВ, $\Theta = 150^\circ$.

Найти: ε_2 ,

Решение. При эффекте Комптона выполняется закон сохранения энергии:

$$\varepsilon_1 + E_0 = \varepsilon_2 + E, \quad (1)$$

где ε_1 , ε_2 – энергии падающего и рассеянного фотонов соответственно; E_0 – энергия покоя свободного электрона ($E_0 = 0,51$ МэВ); E – полная энергия электрона отдачи.

Для определения энергии рассеянного фотона воспользуемся формулой Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\Theta), \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн падающего и рассеянного фотонов соответственно; h – постоянная Планка; m_0 – масса покоя электрона; c – скорость света в вакууме, Θ – угол рассеяния фотона.

Перепишем формулу (2) с учётом того, что $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$:

$$\frac{hc}{\varepsilon_2} - \frac{hc}{\varepsilon_1} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\Theta).$$

Далее, сокращая последнее выражение на hc , найдём искомую энергию:

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 m_0 c^2}{m_0 c^2 + \varepsilon_1 (-\cos\Theta)} = \frac{\varepsilon_1 E_0}{E_0 + \varepsilon_1 (-\cos\Theta)} \quad (3)$$

Для определения импульса электрона воспользуемся формулой связи импульса и энергии

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2}, \quad (4)$$

где E – полная энергия электрона.

Согласно уравнению (1), полная энергия электрона после рассеяния фотона равна: $E = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + E_0$. С учётом этого выражение (4) принимает вид

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + E_0)^2 - E_0^2}, \quad (5)$$

где ε_2 – энергия рассеянного фотона, определяемая выражением (3).

Подставляя в уравнения (3) и (5) числовые значения, получим:

$$\varepsilon_2 = \frac{1,02 \cdot 0,51}{0,51 + 1,02 (-\cos 150)} = 0,215 \text{ МэВ};$$

$$p = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \sqrt{[1,02 - 0,215 + 0,51] \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}^2 - [0,51 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}]^2 =$$

$$= 3,22 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Задача 8. Монохроматический ($\lambda = 0,582$ мкм) пучок света падает перпендикулярно на поверхность S с коэффициентом отражения $\rho = 0,7$. Определить число фотонов, падающих на 1 см^2 этой поверхности за время $t = 1$ с, если давление света на данную поверхность $p = 1,2$ мкПа. Найти также число фотонов в $V = 1 \text{ см}^3$ падающего светового пучка.

Дано: $\lambda = 0,582$ мкм; $\rho = 0,7$; $\alpha = 0$; $S = 1 \text{ см}^2$; $t = 1$ с; $p = 1,2$ мкПа; $V = 1 \text{ см}^3$.

Найти: N , N_0 .

Решение. Давление, производимое светом на поверхность при его перпендикулярном падении ($\alpha = 0$), определяется соотношением

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

где E – энергия светового потока, падающего на единицу поверхности за единицу времени; c – скорость света; ρ – коэффициент отражения поверхности.

С другой стороны, энергия E может быть выражена через число фотонов N , падающих на единицу поверхности в единицу времени:

$$E = N\varepsilon = N \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$ – энергия падающего фотона. Тогда на основании (1) и (2)

получим: $p = \frac{N}{c} \frac{hc}{\lambda} (1 + \rho)$, откуда

$$N = \frac{p\lambda}{h(1 + \rho)}. \quad (3)$$

Подставляя в выражение (3) числовые данные, получим число фотонов, падающих на 1 м^2 поверхности в течение 1 с.

В соответствии с (3) на площадку $S = 1 \text{ см}^2$ падает число фотонов

$$N' = NS = \frac{p\lambda S}{h(1 + \rho)}. \quad (4)$$

Подставляя в формулу (4) числовые данные в системе СИ $S = 10^{-4} \text{ м}^2$, получим $N' = 5,1 \cdot 10^{16}$ фотонов.

Концентрация фотонов в падающем луче вблизи поверхности определяется формулой

$$n_0 = \frac{N}{c},$$

где n_0 – число фотонов в объёме $V_0 = 1 \text{ м}^3$.

Тогда число фотонов в произвольном объёме V равно

$$N'_0 = n_0 V = \frac{N}{c} V = \frac{p\lambda V}{hc(1 + \rho)}. \quad (5)$$

Подставляя числовые данные в (5), получим

$$n'_0 = \frac{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,582 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,7} \approx 2,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}.$$

Задача 9. Цезий освещается монохроматическим светом с длиной волны λ . Определите максимальную скорость фотоэлектронов, если красная граница цезия λ_0 известна.

Дано: λ_0 .

Найти: v_{\max} .

Решение. Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (1)$$

Работа выхода электронов из металла:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}} = h \frac{c}{\lambda_0}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), найдём искомую максимальную скорость фотоэлектронов:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right)}.$$

Задача 10. Энергия π -мезона, возникающего в верхних слоях атмосферы составляет $E = 6$ ГэВ, а его собственное время жизни равно $\tau = 26$ нс. Полагая, что масса π -мезона в лабораторной системе отсчета равна 273 массам электрона (m_0), определить время его жизни в этой системе отсчета.

Дано: $E = 6$ ГэВ, $\tau = 26$ нс, $m = Nm_0$, $N = 273$.

Найти: t .

Решение. Согласно следствию из преобразований Лоренца для времени:

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (1)$$

Согласно условию задачи и закону о взаимосвязи массы частицы и его полной энергии, имеем

$$E = mc^2 = \frac{Nm_0c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Из последней формулы следует, что

$$\sqrt{1 - (v/c)^2} = Nm_0c^2 / E.$$

Тогда искомое время жизни π -мезона (1) в лабораторной системе отсчета равно:

$$\tau' = \frac{\tau E}{Nm_0c^2} = 1,11 \text{ мкс.}$$

Задача 11. Прямоугольник со сторонами a_0 и b_0 покоится в системе отсчёта K' , которая перемещается относительно системы K со скоростью $U = 0,8c$ (c – скорость света в вакууме). Принимая, что плоскость прямоугольника совпадает с плоскостью $x'O'y'$, а направление движения системы K' параллельно стороне b_0 прямоугольника (рис. 5.21), найти площадь прямоугольника в системе K .

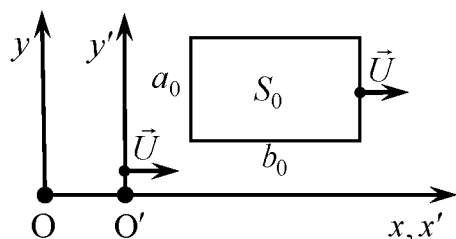


Рис. 5.21

Дано: $a_0, b_0, U = \beta c, \beta = 0,8$.

Найти: S .

Решение. Площадь прямоугольника в системе отсчёта K определяется выражением

$$S = ab, \quad (1)$$

где a и b – длины сторон прямоугольника в системе отсчёта K .

Из преобразований Лоренца

$$\begin{cases} l_x = l_{0x} \sqrt{1 - \left(\frac{U}{c}\right)^2} = l_{0x} \sqrt{1 - \beta^2}; \\ l_y = l_{0y}; \\ l_z = l_{0z}, \end{cases}$$

следует, что размеры прямоугольника:

а) в направлении оси Oy не изменятся, т.е.

$$a = a_0; \quad (2)$$

б) в направлении оси Ox претерпят релятивистское сокращение, т.е.

$$b = b_0 \sqrt{1 - \left(\frac{U}{c}\right)^2} = b_0 \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (3)$$

С учётом уравнений (2) и (3) уравнение (1) окончательно примет вид

$$S = a_0 b_0 \sqrt{1 - \beta^2} = S_0 \sqrt{1 - \beta^2},$$

где $S_0 = a_0 b_0$ – площадь прямоугольника в системе отсчёта K' .

Подставляя числовые данные в последнее соотношение, получаем:

$$S = a_0 b_0 \sqrt{1 - 0,64} = 0,6 S_0.$$

Задача 12. Определить релятивистский импульс электрона, обладающего кинетической энергией $T = 5$ МэВ.

Дано: $T = 5 \cdot 10^6$ эВ, $E_0 = 0,51$ МэВ.

Найти: p .

Решение. Релятивистский импульс частицы определяется по формуле

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

Так как скорость электрона не дана в условии задачи, необходимо выразить релятивистский импульс непосредственно через кинетическую энергию. Для этого воспользуемся формулой связи полной энергии частицы и её релятивистского импульса:

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2,$$

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

Отсюда релятивистский импульс электрона:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2} = \frac{1}{c} \sqrt{(E - E_0)(E + E_0)}. \quad (1)$$

Очевидно, что разность между полной энергией и энергией покоя частицы равна её кинетической энергии ($E - E_0 = T$), а их сумма равна $E + E_0 = T + 2E_0$.

С учётом этого выражение (1) принимает вид

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{T(E + 2E_0)}. \quad (2)$$

Подставляя числовые данные в (2), получаем:

$$p = \frac{\sqrt{5(5 + 2 \cdot 0,51) \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}}{3 \cdot 10^8} = 2,93 \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}}.$$

5.3. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 5

Номера вариантов и задач к контрольной работе

Варианты	Номера задач									
0	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
1	501	511	521	531	541	551	561	571	581	591
2	502	512	522	532	542	552	562	572	582	592
3	503	513	523	533	543	553	563	573	583	593
4	504	514	524	534	544	554	564	574	584	594
5	505	515	525	535	545	555	565	575	585	595
6	506	516	526	536	546	556	566	576	586	596
7	507	517	527	537	547	557	567	577	587	597
8	508	518	528	538	548	558	568	578	588	598
9	509	519	529	539	549	559	569	579	589	599

501. Скорость распространения колебаний от источника, колеблющегося по закону $x(t) = 0,5\sin(50t)$, в однородной, изотропной и непоглощающей среде равна $v = 50$ м/с. Считая волну плоской, запишите её уравнение. Найдите: длину волны λ ; разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний двух точек среды, отстоящих от источника на расстояния $x_1 = 10$ м и $x_2 = 50$ м в направлении распространения волны.

502. Уравнение плоской звуковой волны имеет вид $\xi(x,t) = 50\sin(1000t - 4x)$ мкм, время задано в секундах, расстояние – в метрах. Определите: отношение амплитуды смещения частиц среды к длине волны; амплитуду колебаний скорости частиц среды и её отношение к скорости распространения волны.

503. Плоская гармоническая волна с амплитудой $A = 4$ см распространяется в однородной и изотропной среде. Скорость распространения волны $v = 20$ м/с. Разность фаз колебаний двух точек среды, находящихся на расстоянии $x_1 = 3$ м и $x_2 = 5$ м от источника колебаний в направлении распространения волны, равна $\Delta\varphi = 0,4\pi$. Определить длину волны λ и записать уравнение волны.

504. Точечный источник, расположенный в однородной и изотропной среде, испускает звуковые колебания с частотой $\nu = 1,5$ кГц. На расстоянии $r_0 = 3$ м от источника амплитуда смещения частиц среды $a_0 = 30$ мкм, а в точке А, находящейся на расстоянии $r = 6$ м от

источника, амплитуда смещения в $\eta = 3$ раза меньше. Найти амплитуду колебаний скорости частиц среды в точке А.

505. В упругой однородной среде распространяется плоская волна, описываемая уравнением $\xi(x,t) = A_0 \exp(-\gamma x) \sin(\omega t - kx)$, где A_0 , γ , ω , k – постоянные коэффициенты. Принимая, что $\lambda = 3$ м и $\gamma = 0,3 \text{ м}^{-1}$, найти разность фаз $\Delta\varphi$ в точках для которых отношение амплитуд смещения частиц $\eta = 1,03$.

506. Плоская волна с периодом $T = 1,5$ с и амплитудой $A = 4$ см распространяется в однородной, изотропной и непоглощающей среде со скоростью $v = 15$ м/с. Записать уравнение волны и определить смещение и скорость точки, находящейся на расстоянии $x = 60$ м от источника, в направлении распространения волны в тот момент, когда от начала колебаний источника прошло время: а) 3 с; б) 6 с.

507. Стоячая волна образуется при наложении бегущей гармонической волны и волны, отражённой от границы раздела двух сред. Найти положение (от границы раздела сред) узлов и пучностей стоячей волны, если отражение бегущей волны происходит от менее плотной среды. Скорость распространения волн $v = 330$ м/с, частота $\nu = 2$ кГц.

508. Стоячая волна образуется при наложении бегущей гармонической волны и волны, отражённой от границы раздела сред. Найти положение (от границы раздела сред) узлов и пучностей стоячей волны, если отражение бегущей волны происходит от более плотной среды. Длина волны $\lambda = 0,11$ м, частота $\nu = 3$ кГц.

509. Стоячая волна образуется при наложении бегущей гармонической волны частотой $\nu = 4,5$ кГц и волны, отражённой от более плотной среды. Определить длину бегущей волны и записать её уравнение, если в стоячей волне расстояние l между первой и седьмой пучностями равно 21 см.

510. Стоячая волна образуется при наложении бегущей гармонической волны частотой $\nu = 3$ кГц и волны, отражённой от менее плотной среды. Определить длину бегущей волны и записать её уравнение, если в стоячей волне расстояние l между вторым и шестым узлами равно 32 см.

511. На экране наблюдается интерференционная картина волн от двух когерентных источников ($\lambda = 600$ нм). При помещении на пути одного луча перпендикулярно ему мыльной плёнки интер-

ференционная картина изменяется на противоположную. При какой минимальной толщине d мыльной плёнки это возможно?

512. После того как в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместили перпендикулярно ему тонкую стеклянную пластинку, центральная светлая полоса сместилась в положение, первоначально занимаемое пятой светлой полосой. Длина волны $\lambda = 500$ нм. Определить толщину пластинки.

513. Найти длину волны λ монохроматического излучения в опыте Юнга, если расстояние между щелями $d = 0,5$ см, расстояние от щелей до экрана $a = 5$ м, на экране расстояние между первым и центральным интерференционными максимумами $x = 0,05$ см.

514. В опыте Юнга стеклянная пластинка толщиной $d = 1$ см помещается на пути одного из интерферирующих лучей перпендикулярно ему. На сколько могут отличаться друг от друга значения показателя преломления n в различных точках неоднородной пластинки, чтобы изменение разности хода лучей от этой неоднородности не превышало $0,6$ мкм?

515. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света $d = 0,5$ мм, расстояние до экрана $L = 5$ м. В зеленом свете получились интерференционные полосы, расположенные на расстоянии $l = 5$ мм друг от друга. Найти длину волны λ зеленого света.

516. Во сколько раз изменится расстояние Δu между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если красный светофильтр ($\lambda_1 = 600$ нм) заменить зеленым ($\lambda_2 = 500$ нм)?

517. На экране наблюдается интерференционная картина волн от двух когерентных источников ($\lambda = 500$ нм). На пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили стеклянную пластинку толщиной $d = 5$ мкм. Определить, на сколько полос сместится при этом интерференционная картина.

518. Определить, во сколько раз увеличится ширина интерференционных полос на экране в опыте с зеркалами Френеля, если фиолетовый светофильтр ($\lambda_1 = 0,4$ мкм) заменить красным ($\lambda_2 = 0,7$ мкм).

519. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом ($\lambda = 600$ нм). Расстояние между отверстиями $d = 1$ мм, расстояние от отверстий до экрана $L = 3$ м. Найти координаты трёх первых светлых полос.

520. Расстояние L от щелей до экрана в опыте Юнга равно 1,5 м. Определить расстояние d между щелями, если на отрезке длиной $l = 1$ см укладывается $N = 8$ темных интерференционных полос. Длина волны $\lambda = 0,6$ мкм.

521. На мыльную плёнку, находящуюся в воздухе, в направлении нормали к её поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Определить минимальную толщину d_{min} плёнки, при которой отражённый от плёнки свет вследствие интерференции максимально усилен.

522. На тонкую глицериновую плёнку толщиной $d = 1$ мкм нормально к её поверхности падает белый свет. Определить длины волн λ лучей видимого участка спектра ($0,4 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,8 \text{ мкм}$), которые будут ослаблены в результате интерференции. Наблюдение ведётся в отражённом свете.

523. На стеклянную пластину нанесён тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления $n_1 = 1,4$. Пластинка освещается пучком параллельных лучей с длиной волны $\lambda = 540$ нм, падающим перпендикулярно. Какую минимальную толщину d_{min} должен иметь слой вещества, чтобы отражённые лучи имели наименьшую яркость?

524. Плоско-выпуклая стеклянная линза с фокусным расстоянием $F = 2$ м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отражённом свете $r_5 = 1,5$ мм. Определить длину световой волны λ .

525. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плоско-выпуклой стеклянной линзой находится жидкость. Найти показатель преломления n жидкости, если радиус r_8 восьмого темного кольца Ньютона при наблюдении в отражённом свете с длиной волны $\lambda = 0,7$ мкм равен 2 мм. Радиус кривизны линзы $R = 1$ м.

526. На стеклянную пластинку положена выпуклой стороной вниз плоско-выпуклая стеклянная линза. Сверху линза освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Найти радиус R линзы, если радиус восьмого темного кольца Ньютона в отражённом свете $r_8 = 2,4$ мм.

527. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плоско-выпуклой стеклянной линзой находится жидкость. Радиус третьего светлого кольца r_3 Ньютона при наблюдении в отражённом свете с длиной волны $\lambda = 600$ нм равен 0,82 мм. Найти показатель преломления жидкости, если радиус линзы $R = 0,6$ м.

528. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается перпендикулярно падающим монохроматическим светом ($\lambda = 590$ нм). Радиус кривизны стеклянной линзы $R = 5$ см. Определить толщину воздушного зазора h в том месте, где в отражённом свете наблюдается третье светлое кольцо.

529. На тонкий стеклянный клин перпендикулярно падает монохроматический свет. Угол между поверхностями клина равен $\alpha = 3^\circ$. Определить длину световой волны λ , если расстояние b между двумя соседними интерференционными максимумами в отражённом свете равно $0,2$ мм.

530. На тонкий стеклянный клин падает перпендикулярно пучок лучей с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Расстояние между соседними темными интерференционными полосами в отражённом свете $b = 0,4$ мм. Определить угол α между поверхностями клина.

531. На щель шириной $a = 6\lambda$ падает перпендикулярно параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Под каким углом φ будет наблюдаться третий дифракционный минимум интенсивности света?

532. На узкую щель падает перпендикулярно монохроматическая волна с $\lambda = 550$ нм. Угол отклонения лучей, соответствующий второму дифракционному максимуму, равен $\varphi = 30^\circ$. Определить ширину щели b .

533. На щель шириной $a = 0,2$ мм перпендикулярно падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном параллельно щели. Определите расстояние l между дифракционными минимумами второго порядка, если расстояние L от щели до экрана равно $1,5$ м.

534. На дифракционную решётку перпендикулярно к её поверхности падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решётки в $n = 3,5$ раза больше длины световой волны. Найти общее число N главных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.

535. На дифракционную решётку в направлении нормали к её поверхности падает монохроматический свет. Период решётки $d = 2$ мкм. Найти наибольший порядок главного максимума, который даёт эта решётка в случае красного ($\lambda_1 = 0,7$ мкм) и в случае фиолетового ($\lambda_2 = 0,45$ мкм) света.

536. Дифракционная решётка, освещённая перпендикулярно

падающим монохроматическим светом, даёт спектр третьего порядка под углом $\varphi = 30^\circ$. Под каким углом наблюдается спектр четвёртого порядка?

537. На дифракционную решётку падает перпендикулярно параллельный пучок лучей белого света. Спектры третьего и четвёртого порядков частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвёртого порядка накладывается граница ($\lambda = 780$ нм) спектра третьего порядка?

538. На дифракционную решётку, содержащую $n = 600$ штрихов на 1 мм её длины, падает перпендикулярно белый свет. Спектр проецируется на экран помещённой вблизи решётки линзой. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана $L = 12$ м. Границы видимого спектра: $\lambda_{кр} = 780$ нм, $\lambda_{ф} = 400$ нм.

539. Какое наименьшее число N_{min} штрихов должна содержать дифракционная решётка, чтобы в спектре второго порядка можно было видеть отдельно две жёлтые линии натрия с длинами волн $\lambda_1 = 589$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм? Какова длина l такой решётки, если постоянная решётки $d = 5$ мкм?

540. Постоянная дифракционной решётки равна $d = 2$ мкм, а её ширина составляет $l = 2,5$ см. Какую разность длин волн может разрешить эта решётка в области жёлтых лучей в спектре 1-го порядка?

541. Луч естественного света последовательно проходит через два поляризатора, плоскости пропускания которых образуют между собой угол $\varphi = 40^\circ$. Принимая коэффициент поглощения k каждого поляризатора равным 0,15, найти, во сколько раз луч, выходящий из второго поляризатора, ослаблен по сравнению с лучом, падающим на первый из них.

542. Интенсивность света, прошедшего через анализатор и поляризатор, составляет $\eta = 12\%$ от интенсивности падающего естественного света. Коэффициенты поглощения света k для поляризатора и анализатора одинаковы и равны 0,07 для каждого из них. Найти угол φ между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Потери на отражение не учитывать.

543. Пучок естественного света падает на систему из пяти поляризаторов, плоскость пропускания каждого из которых повернута на угол $\varphi = 15^\circ$ относительно плоскости пропускания

предыдущего. Определить, какая часть светового потока проходит через данную систему поляризаторов. Потери на отражение и поглощение не учитывать.

544. Два поляризатора расположены так, что угол φ между их плоскостями пропускания составляет 60° . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении: 1) через один поляризатор; 2) через оба поляризатора. Потери при прохождении света составляют $k = 5\%$ для каждого поляризатора.

545. Угол падения луча на поверхность некоторой жидкости $i_1 = 50^\circ$. При этом отражённый луч максимально поляризован. Определить угол преломления луча i_2 .

546. Свет, распространяющийся в стеклянном сосуде с водой, отражается от дна сосуда. При каком угле i_1 падения отражённый луч максимально поляризован?

547. Световая волна переходит из глицерина в стекло так, что отражённый от границы раздела этих сред свет оказывается максимально поляризованным. Определить угол γ между падающим и преломленным лучами.

548. Предельный угол полного отражения света на границе жидкости с воздухом $\alpha_0 = 43^\circ$. Определить угол Брюстера i_B для луча, падающего из воздуха на поверхность этой жидкости.

549. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отражённые от поверхности озера, были наиболее полно поляризованы?

550. Свет распространяется через жидкость, налитую в стеклянный сосуд, и отражается от его дна. Если угол падения света на дно сосуда $i_B = 42^\circ 37'$, то отражённый свет оказывается полностью поляризованным. Найти показатель преломления жидкости. Под каким углом α должен падать на дно сосуда свет, чтобы наступило полное внутреннее отражение?

551. Абсолютно чёрное тело имеет температуру $T_1 = 500$ К. Какова будет температура T_2 тела, если в результате нагревания его энергетическая светимость увеличилась в $\beta = 5$ раз?

552. Вычислить с помощью формулы Планка числовое значение постоянной b_1 в законе смещения Вина.

553. Определить температуру T и энергетическую светимость (излучательность) R_T^* абсолютно чёрного тела, если максимум

энергии излучения приходится на длину волны $\lambda_m = 600$ нм.

554. Поток излучения абсолютно чёрного тела $\Phi = 10$ кВт, максимум энергии излучения приходится на длину волны $\lambda_m = 0,8$ мкм. Определить площадь S излучающей поверхности.

555. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно чёрного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ($\lambda_{m1} = 760$ нм) на фиолетовую границу ($\lambda_{m2} = 390$ нм)?

556. Вычислить с помощью формулы Планка длину волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, если его температура 1500 К.

557. При остывании абсолютно чёрного тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на $\Delta\lambda$. Определите температуру, до которой тело охладилось, если его первоначальная температура T_1 .

558. Определите количество теплоты, теряемой расплавленным железом за время $t = 1$ мин, если поглощательная способность железа $a_T = 0,4$. Температура плавления железа равна 1530 °С, а площадь поверхности $S = 20$ см².

559. Температура верхних слоёв некоторой звезды $T = 1000$ К. Определить энергию, излучаемую с каждого квадратного километра поверхности этой звезды за одну секунду.

560. Температура абсолютно чёрного тела изменилась при нагревании от $T_1 = 1000$ до $T_2 = 3000$ К. Во сколько раз при этом изменилась его энергетическая светимость R_T^* ? На сколько изменилась длина волны λ_m , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости?

561. При некотором максимальном значении задерживающей разности потенциалов фототок с поверхности цезия, освещаемой электромагнитным излучением с длиной волны λ_0 , прекращается. Изменив длину волны излучения в $n = 2,0$ раза, установили, что для прекращения фототока необходимо увеличить задерживающую разность потенциалов в $\eta = 2,5$ раза. Вычислить λ_0 .

562. Найти работу выхода с поверхности некоторого металла, если при поочерёдном освещении его электромагнитным излучением с длинами волн $\lambda_1 = 350$ нм и $\lambda_2 = 540$ нм максимальные скорости фотоэлектронов отличаются в $\eta = 2,0$ раза.

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

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

565. Какова должна быть длина волны γ -лучей, падающих на платиновую пластину, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была $v_{max} = 3$ Мм/с?

566. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетовых лучей ($\lambda = 0,25$ мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов $U_{min} = 0,96$ В. Определить работу выхода $A_{вых}$ электронов из металла.

567. Поверхность металла освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,7$ мкм. Красная граница при двухфотонном фотоэффекте $\lambda_0 = 0,6$ мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение фотоэлектрону кинетической энергии?

568. На металл падают рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 1$ нм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость v_{max} фотоэлектронов при двухфотонном фотоэффекте.

569. Какая доля энергии фотона израсходована на работу выхода фотоэлектрона, если красная граница при трёхфотонном фотоэффекте $\lambda_0 = 500$ нм, а максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона $T_{max} = 0,5$ эВ?

570. Найти значение постоянной Планка, если известно, что электроны, вырываемые с поверхности металла светом с частотой $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$ Гц, полностью задерживаются разностью потенциалов $U_1 = 6,6$ В, а вырываемые светом с частотой $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$ Гц – разностью потенциалов $U_2 = 16,5$ В.

571. Фотон испытал комптоновское рассеяние на угол $\Theta = 90^\circ$. Найти импульс налетающего фотона, если энергия рассеянного фотона равна кинетической энергии электрона отдачи.

572. Фотон с энергией $\varepsilon_1 = 1,02$ МэВ был рассеян при эффекте Комптона на угол $\Theta = 180^\circ$. Определить кинетическую энергию T электрона отдачи.

573. Энергия рентгеновских лучей $\varepsilon_1 = 0,6$ МэВ. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, если длина волны рентгеновских лучей после их комптоновского рассеяния изменилась на $\eta = 20\%$.

574. Какая доля энергии падающего фотона приходится при эффекте Комптона на электрон отдачи, если угол рассеяния фотона $\Theta = 120^\circ$? Импульс фотона до рассеяния $p_1 = 60$ кэВ/ c (c – скорость света в вакууме).

575. Фотон при эффекте Комптона на свободном электроне был рассеян на угол $\Theta = \pi$. Определить импульс p , приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была $\varepsilon_1 = 0,51$ МэВ.

576. Определить угол Θ рассеяния γ -кванта с энергией $\varepsilon_1 = 1,02$ МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи $T = 0,51$ МэВ.

577. При комптоновском рассеянии энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния $\Theta = \pi/2$. Найти энергию ε_2 и импульс p_ϕ рассеянного фотона.

578. Определить максимальное изменение длины волны ($\Delta\lambda_{\max}$) при комптоновском рассеянии света на: а) свободных электронах; б) свободных протонах.

579. Найти, под каким углом φ к направлению падающих фотонов с энергией $\varepsilon_1 = 1,5$ МэВ отлетит комптоновский электрон, если энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи.

580. Рентгеновские лучи ($\lambda = 1$ нм) рассеиваются свободными электронами. Определить максимальную длину волны λ_{\max} рентгеновских лучей в рассеянном луче.

581. Определить энергетическую освещённость E зеркальной поверхности, если производимое излучением давление $p = 40$ мкПа. Лучи падают перпендикулярно к поверхности.

582. Давление p света с длиной волны $\lambda = 400$ нм, падающего перпендикулярно на чёрную поверхность, равно 2 нПа. Определить число N фотонов, падающих за время $t = 10$ с на площадь $S = 1$ мм² этой поверхности.

583. Определить коэффициент отражения ρ поверхности, если при энергетической освещённости $E = 120$ Вт/м² давление p света на неё оказалось равным 0,5 мкПа. Лучи падают перпендикулярно к поверхности.

584. Давление света p , производимое на зеркальную поверхность, равно 4 мПа. Определить концентрацию n_0 фотонов вблизи поверхности, если длина волны λ света, падающего на поверхность, равна 0,5 мкм. Лучи падают перпендикулярно к поверхности.

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

586. Свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм падает перпендикулярно на зеркальную поверхность и создаёт на неё давление $p = 4$ мкПа. Определить число N фотонов, падающих за время $t = 10$ с на площадь $S = 1$ мм² этой поверхности.

587. На зеркальную поверхность площадью $S = 6$ см² падает перпендикулярно поток излучения $\Phi_e = 0,8$ Вт. Определить давление p и силу давления F на эту поверхность.

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

589. На зеркало с идеально отражающей поверхностью площадью $S = 2$ см² перпендикулярно падает свет от электрической дуги. Определить импульс, полученный зеркалом, если энергетическая освещённость поверхности $E = 0,2$ МВт/м². Продолжительность облучения $t = 1$ с.

590. Найти давление света на внутренние стенки колбы электрической лампы мощностью $N = 40$ Вт; считать, что $\chi = 5$ % потребляемой лампой мощности идет на излучение. Колба представляет собой стеклянный сферический сосуд радиусом $R = 4$ см, стенки которого отражают $\rho = 5$ % и пропускают $\gamma = 80$ % падающего на них света.

591. Чему равно относительное приращение длины стержня $\Delta l/l_0$, если ему сообщить скорость $v = 0,5c$ (c – скорость света в вакууме) в направлении, образующем с осью покоившегося стержня угол $\alpha = 45^\circ$.

592. Суммарная площадь поверхности неподвижного куба равна S_0 . Чему равна площадь поверхности S этого куба, если он движется в направлении одного из своих рёбер со скоростью $v = 0,95c$.

593. Собственное время жизни мюона (нестабильной элементарной

частицы) составляет $\tau_0 = 2,2$ мкс. Определить время жизни τ мюона в системе отсчёта, в которой он проходит до распада путь $l = 30$ км. Считая движение мюона прямолинейным и равномерным, найти его скорость.

594. Частица движется со скоростью $v = 1/3c$ (c – скорость света в вакууме). Какую долю энергии покоя составляет кинетическая энергия частицы?

595. Протон с кинетической энергией $T = 3$ ГэВ при торможении потерял треть своей кинетической энергии. Определить, во сколько раз изменился импульс протона.

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

597. Во сколько раз масса m электрона, обладающего кинетической энергией $T = 2,0$ МэВ, больше его массы покоя m_0 ?

598. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы его скорость составила $\beta = 95\%$ скорости света?

599. При движении протона произошло увеличение его релятивистского импульса в $n = 3$ раза. Во сколько раз изменилась его релятивистская масса, если начальный импульс протона $p = 2,2 \cdot 10^{-19}$ кгм/с.

600. Электрон движется со скоростью $0,6c$ (c – скорость света в вакууме). Какую работу необходимо совершить, чтобы увеличить скорость электрона до $0,8c$?

РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

6.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И СООТНОШЕНИЯ

Боровская теория атома водорода

1. Момент импульса электрона, находящегося на стационарной орбите:

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

где m – масса электрона; v_n – скорость электрона на n -й орбите; r_n – радиус n -й стационарной орбиты; \hbar – приведённая постоянная Планка ($\hbar = h/2\pi$); $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число (номер орбиты).

2. Радиус n -й стационарной орбиты:

$$r_n = r_1 n^2,$$

где $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м – первый боровский радиус.

3. Скорость электрона на n -й стационарной орбите:

$$v_n = v_1 \frac{1}{n},$$

где v_1 – скорость электрона на первой стационарной орбите.

4. Уравнение движения электрона в водородоподобном ионе, полученное из тех соображений, что роль центростремительной силы играет кулоновская сила притяжения его к ядру атома:

$$m \frac{v_n^2}{r_n} = \frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2},$$

где m – масса электрона, v_n – скорость электрона на n -й орбите; r_n – радиус n -й орбиты; e – заряд электрона; Z – порядковый номер водородоподобного иона (для атома водорода $Z = 1$).

5. Энергия электрона в водородоподобном ионе (для атома водорода $Z = 1$):

$$E_n = U_n + T_n = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m Z^2 e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2} = E_1 \frac{1}{n^2},$$

где $U_n = -\frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$ – потенциальная энергия взаимодействия

электрона с ядром; $T_n = \frac{m v_n^2}{2}$ – кинетическая энергия электрона;

$E_1 = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{mZ^2 e^4}{\hbar^2} = -13,56Z^2 \text{ эВ}$ – полная энергия электрона на первой стационарной орбите (в основном состоянии).

6. Энергия ионизации E_i водородоподобного иона (энергия, необходимая для отрыва единственного электрона от ядра):

$$E_i = E_1 = |e|U_i,$$

где U_i – «потенциал» ионизации.

7. Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода (водородоподобным ионом):

$$E = \hbar\omega = E_{n_2} - E_{n_1},$$

или

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

где n_1 и n_2 – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершался переход электрона в атоме; E_{n_1} и E_{n_2} – энергии электрона на соответствующих орбитах; E_i – энергия ионизации атома.

8. Сериальная формула, определяющая длину волны λ (частоту ν) света, соответствующую линиям спектра водородоподобного иона (для атома водорода рис. 6.1):

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

где n_1 определяет серию спектра ($n_1 = 1, 2, 3, \dots$); n_2 – определяет отдельную линию этой серии ($n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots$); R и R' – постоянные Ридберга ($R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $R' = cR = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$); Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева (для атома водорода $Z = 1$).

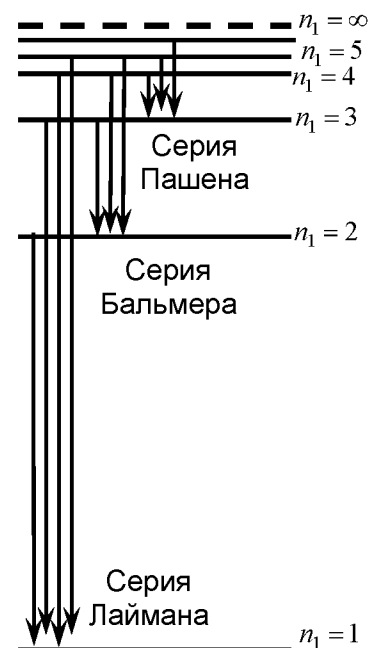


Рис. 6.1

Волновые свойства частиц

1. Соотношения де Бройля для энергии E и импульса p частицы:

$$E = h\nu_B = h \frac{c}{\lambda_B}; \quad p = \frac{h}{\lambda_B},$$

где h – постоянная Планка; ν_B – частота волны де Бройля; p – импульс частицы; c – скорость света в вакууме; λ_B – длина волны де Бройля.

2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar, \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где Δx – неопределённость координаты; Δp_x – неопределённость проекции импульса на ось x ; ΔE – неопределённость энергии квантовой системы; Δt – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

3. Временное уравнение Шрёдингера:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U(x, y, z, t) \Psi,$$

где i – мнимая единица ($i = \sqrt{-1}$); $\Psi(x, y, z, t)$ – волновая функция, описывающая состояние системы (частицы); m – масса частицы;

$\hat{H} = \hat{T} + \hat{U} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + \hat{U}$ – оператор Гамильтона (оператор полной

энергии системы); $\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

$\hat{U}(x, y, z, t)$ – оператор взаимодействия системы (частицы) с другими системами (частицами).

4. Волновая функция частицы в стационарном состоянии:

$$\Psi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z) \exp(-iEt/\hbar),$$

где $\varphi(x, y, z) = C \exp(-iEt/\hbar) = C \exp(-i\omega t)$ – временная часть волновой

функции; E – полная энергия частицы; $\psi(x, y, z)$ – координатная часть волновой функции, определяемая из решения стационарного

уравнения Шрёдингера $\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$; $U(x, y, z, t) = U(x, y, z)$

– потенциальная энергия частицы.

5. Одномерное уравнение Шрёдингера для стационарных состояний:

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

где $\psi(x)$ – координатная часть волновой функции, описывающая

состояние частицы; m – масса частицы; E – полная энергия частицы; $U = U(x)$ – потенциальная энергия частицы.

6. Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2 :

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

где $|\psi(x)|^2 = \frac{dw(x)}{dx}$ – плотность вероятности.

7. Частица, находящаяся в бесконечно высоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике (бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме прямоугольной формы).

7.1. Собственные волновые функции частицы:

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right),$$

где n – квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$); l – ширина ящика; x – координата ($0 \leq x \leq l$).

7.2. Собственные значения энергии частицы:

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

где m – масса частицы.

8. Коэффициент прозрачности D прямоугольного потенциального барьера конечной ширины l :

$$D \approx D_0 \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U - E)} l\right],$$

где $D_0 = 1$ – множитель, приравняемый к единице; U – высота потенциального барьера; E и m – энергия и масса частицы.

Квантовые числа.

Заполнение электронных оболочек атомов

1. Состояние каждого электрона в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами:

- главным n ($n = 1, 2, 3, \dots$),
- азимутальным (орбитальным) l ($l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$),
- магнитным m_l ($m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$),
- спиновым m_s ($m_s = +1/2, -1/2$).

2. Обозначение оболочек и подоболочек (в некоторых учебниках и пособиях оболочки называются слоями, а подоболочки – оболочками).

2.1. Номер электронной оболочки (совпадает с номером главного квантового числа n):

n	1	2	3	4	...
Обозначение оболочки	K	L	M	N	...

2.2. Номер электронной подоболочки (совпадает с номером орбитального квантового числа l):

l	0	1	2	3	...
Обозначение подоболочки	s	p	d	f	...

3. Модуль орбитального момента импульса может принимать дискретные значения, определяемые по формуле

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где l – азимутальное квантовое число.

4. Проекция орбитального момента импульса электрона на выделенное направление (ось OZ) может принимать значения, определяемые по формуле

$$L_z = m_l \hbar,$$

где m_l – магнитное квантовое число.

5. Число возможных состояний, соответствующих данному числу n :

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(l+1) = 2n^2.$$

6. Состояние электрона записывается следующим образом: первым записывается главное квантовое число, затем обозначение орбитального квантового числа (например, обозначению $2p$ соответствует электрон с $n = 2$ и $l = 1$). Возможны следующие состояния электрона:

$$1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 4f \text{ и т.д.}$$

Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

1. Массовое число ядра (число нуклонов в ядре):

$$A = Z + N,$$

где Z – число протонов; N – число нейтронов.

2. Дефект массы ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_z,$$

где Z – число протонов в ядре; $A - Z = N$ – число нейтронов в ядре; m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона; m_z – масса ядра.

3. Энергия связи ядра

$$E_{св} = \Delta mc^2,$$

где c – скорость света в вакууме.

В мегаэлектронвольтах (МэВ) энергия связи ядра определяется по формуле:

$$E_{св} = 931\Delta m,$$

где Δm – дефект массы в а.е.м. (1 а.е.м. \approx 931МэВ).

Удельная энергия связи (энергия связи, приходящаяся на один нуклон):

$$E_{уд} = E_{св} / A.$$

4. При ядерных реакциях выполняются законы сохранения:

- а) релятивистской полной энергии;
- б) импульса;
- в) заряда;
- г) числа нуклонов.

5. Способы записи ядерных реакций:

- развёрнутая форма, например, ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$;
- сокращённая форма, например, ${}^9\text{Be} \xrightarrow{\alpha} {}^6\text{Li}$.

Здесь $p - {}^1_1\text{H}$ – протон; $\alpha - {}^4_2\text{He}$ – альфа-частица.

6. Энергетический эффект ядерной реакции:

$$Q = c^2 (\sum m_1 - \sum m_2) \text{ или } Q = 931 (\sum m_1 - \sum m_2) \text{ МэВ,}$$

где $\sum m_1$ – сумма масс частиц до реакции; $\sum m_2$ – сумма масс частиц после реакции. В эту формулу можно подставлять массы изотопов, а не ядер, так как поправки на массу электронной оболочки входят в формулу с разными знаками и поэтому взаимно сокращаются.

Радиоактивность

1. Закон радиоактивного распада:

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

где dN – число ядер, испытывающих распад за время от t до $t + dt$; N – число не испытывавших распад ядер к моменту времени t ; N_0 – начальное количество радиоактивных ядер, в момент времени, с которого начинается наблюдение ($t = 0$); λ – постоянная радиоактивного распада.

2. Зависимость периода полураспада от постоянной радиоактивного распада:

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

где $T_{1/2}$ – период полураспада (время, за которое распадается половина первоначального количества ядер).

3. Число ядер, распавшихся за время t :

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

Если время t , за которое определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, то $\lambda t \ll 1$, и выражение $e^{-\lambda t}$ приближенно можно считать равным $(1 - \lambda t)$. В этом случае число распавшихся ядер можно определить по приближённой формуле

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

4. Среднее время жизни τ радиоактивного ядра, т.е. время, за которое число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз:

$$\tau = 1/\lambda.$$

5. Число атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

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

где m – масса изотопа; μ – молярная масса изотопа; N_A – число Авогадро.

6. Активность радиоактивного изотопа:

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

где dN – число ядер, распадающихся за время dt ; A_0 – активность изотопа в начальный момент времени.

7. Удельная активность изотопа:

$$\alpha = A/m.$$

Элементы физики твёрдого тела и квантовой статистики

1. Средняя энергия квантового гармонического осциллятора при температуре T :

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} + \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1},$$

где $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка; ω – собственная частота классического осциллятора; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

2. Теплоёмкость кристалла (Эйнштейнова теория):

$$C = \frac{3Nx}{\left(e^x - 1 \right)^2} e^x kx,$$

где N – число атомов в кристалле; $x = \frac{\hbar\omega}{kT}$ – переменная; ω – собственная частота классического осциллятора.

3. Теплоёмкость кристалла (теория Дебая):

$$C = 9nk \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \int_0^{x_m} \frac{e^x x^4}{\left(e^x - 1 \right)^2} dx,$$

где n – число атомов в единице объёма кристалла (концентрация атомов); $x = \frac{\hbar\omega}{kT}$ и $x_m = \frac{\hbar\omega_m}{kT} = \frac{\theta}{T}$ – переменные; $\theta = \frac{\hbar\omega_m}{T}$ – температура Дебая; ω_m – максимальная частота нормальных колебаний решётки.

4. Распределение Бозе – Эйнштейна:

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} - 1},$$

где $\langle n_i \rangle$ – среднее число частиц, находящихся в состоянии с номером i ; E_i – энергия частицы в этом состоянии; $\mu \leq 0$ – химический потенциал.

5. Распределение Ферми – Дирака:

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} + 1},$$

где $\langle n_i \rangle$ – среднее число электронов, находящихся в состоянии с энергией E_i ; $\mu = E_F > 0$ – энергия Ферми (уровень Ферми).

6. Энергия Ферми (уровень Ферми) при $T = 0$ К:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n_0)^{2/3},$$

где m – масса электрона; n_0 – концентрация свободных электронов в металле.

6.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Определить для атома водорода радиус третьей боровской орбиты, скорость электрона на ней и период обращения по орбите.

Дано: $n = 3, Z = 1$.

Найти: r_n, v_n, T_n .

Решение. Запишем закон квантования орбит:

$$m v_n r_n = n \hbar = n \frac{h}{2\pi}, \quad (1)$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; v_n – скорость электрона на n -й орбите; r_n – радиус n -й орбиты; n – главное квантовое число (номер орбиты); $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Согласно боровской модели атома, электрон под действием кулоновской силы притяжения движется с постоянной скоростью по круговым орбитам вокруг ядра атома. Тогда второй закон Ньютона для электрона в атоме водорода, где ядро – протон, имеет вид

$$m \frac{v_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}, \quad (2)$$

где $\frac{v_n^2}{r_n}$ – центростремительное ускорение; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

– электрическая постоянная; $e = -1,6 \cdot 10^{-12}$ Кл – заряд электрона.

Решая совместно уравнения (1) и (2) относительно r_n и v_n , получим:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2}; \quad v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}. \quad (3)$$

Период обращения электрона:

$$T_n = \frac{2\pi r_n}{v_n} = \frac{4\epsilon_0^2 h^3 n^3}{m e^4}. \quad (4)$$

Подставив числовые значения в формулы (3) и (4), получим:

$$r_3 = 4,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad v_3 = 7,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}; \quad T_3 = 0,41 \cdot 10^{-14} \text{ с}.$$

Задача 2. Электрон в атоме водорода перешел с третьего энергетического уровня на второй. Определить энергию излучённого при этом фотона.

Дано: $Z = 1, n_1 = 2, n_2 = 3$.

Найти: E .

Решение. Для определения энергии фотона воспользуемся формулой для определения длин волн в спектре водородоподобных ионов:

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

где λ – длина волны излучённого фотона; R – постоянная Ридберга; Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева (для атома водорода $Z = 1$); n_1 – номер орбиты, на которую перешел электрон; n_2 – номер орбиты, с которой перешел электрон.

Энергия фотона выражается формулой

$$E = h \frac{c}{\lambda}.$$

Умножив обе части соотношения (1) на hc , получим выражение для энергии фотона:

$$E = RhcZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (2)$$

Так как величина Rhc есть энергия ионизации E_i атома водорода, то формулу (2) можно представить в виде

$$E = E_i Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (3)$$

Подставив числовые данные в уравнение (3) и учитывая, что $E_i = 13,6$ эВ (прил. табл. П10), получим:

$$E = 13,6 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 1,9 \text{ эВ}.$$

Задача 3. Найти длину волны де Бройля λ_B для электрона, обладающего кинетической энергией $T = 5$ МэВ.

Дано: $T = 5 \cdot 10^6$ эВ = $8,0 \cdot 10^{-13}$ Дж, $m_0 = 9,31 \cdot 10^{-31}$ кг, $E_0 = 0,51$ МэВ.

Найти: λ_B .

Решение. В данной задаче кинетическая энергия электрона больше, чем его энергия покоя $E_0 = m_0 c^2 = 0,51$ МэВ. Следовательно, электрон – релятивистская частица, поэтому его импульс можно определить по формуле

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_0^2 + T^2}. \quad (1)$$

Длина волны де Бройля:

$$\lambda_B = \frac{h}{p},$$

где h – постоянная Планка; p – импульс частицы.

С учётом (1) соотношение для длины волны де Бройля примет вид

$$\lambda_B = \frac{hc}{\sqrt{E_0 + T}}.$$

Подставляя числовые значения физических величин в последнее уравнение, получаем:

$$\lambda_B = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Задача 4. Используя соотношения неопределённостей, определить наименьшую неточность, с которой можно вычислить координату электрона в атоме. Средняя кинетическая энергия электрона в невозбуждённом атоме водорода равна $T = 13,6$ эВ.

Дано: $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $T = 13,6$ эВ = $21,76 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Найти: Δx_{min} .

Решение. Соотношение неопределённостей для координаты и импульса имеет вид

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

отсюда неточность координаты частицы

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{\Delta p_x}. \quad (1)$$

Электрон по условию данной задачи является нерелятивистской частицей ($T \ll E_0$). С учётом этого запишем соотношение, связывающее импульс электрона с его кинетической энергией:

$$p = \sqrt{2mT}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет определить модуль вектора импульса. Проекция p_x импульса на ось x оказывается неопределённой, так как она изменяется в интервале $[-p, p]$. Поэтому в качестве неопределённости импульса Δp_x можно взять величину, не превышающую значение самого импульса:

$$\Delta p_x \leq p.$$

Отсюда с учётом (1) и (2):

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{\sqrt{2mT}}. \quad (3)$$

Подставляя числовые значения в выражение (3), получаем:

$$\Delta x \geq 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м} \Rightarrow \Delta x_{\min} = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Из решения видно, что наименьшая неточность в определении координаты электрона в атоме примерно равна радиусу первой боровской орбиты ($r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м.).

Задача 4. Исходя из соотношения неопределённостей $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$, оцените размер атома водорода.

Решение. Полная энергия электрона в основном состоянии складывается из кинетической энергии этого электрона и потенциальной энергии его взаимодействия с ядром атома водорода (протоном):

$$E = E_k + E_p = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (1)$$

где $E_k = (p^2/2m)$ – кинетическая энергия электрона; $E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ – потенциальная энергия электрона; p и m – импульс и масса электрона соответственно; r – расстояние между электроном и ядром атома (радиус атома).

Очевидно, что в состоянии с минимальной энергией (атом рассматривается в основном состоянии) электрон обладает минимальным импульсом. Поэтому неопределённости координаты и импульса электрона можно принять приблизительно равными самим этим величинам, т.е. $\Delta r \approx r$ и $\Delta p \approx p$. Тогда соотношение неопределённостей $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$ можно представить в виде

$$p = \frac{\hbar}{r}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим:

$$E = \frac{\hbar^2}{2mr^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (3)$$

По условию задачи необходимо «определить» минимальный радиус атома, т.е. $r = r_{\min}$. Для этого продифференцируем выражение (3) по r и приравняем производную нулю:

$$-\frac{\hbar^2}{mr^3} + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 0,$$

откуда $r_{\min} = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2}$. Последнее выражение совпадает с первым

боровским радиусом атома водорода $r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2}$.

Задача 5. Частица находится в возбуждённом состоянии ($n = 3$) в одномерном потенциальном ящике шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками ($0 < x < l$). Определить вероятность обнаружения частицы в средней трети ящика.

Дано: $l/3 \leq x \leq 2l/3$, $n = 3$.

Найти: w .

Решение. В одномерном случае вероятность dw обнаружения частицы в малом интервале dx можно определить по формуле

$$dw = |\psi(x)|^2 dx,$$

где $|\psi(x)|^2$ – плотность вероятности.

Вероятность обнаружения частицы в средней трети ящика, т.е. в интервале $[l/3 < x < 2l/3]$, выразится через интеграл:

$$w = \int_{l/3}^{2l/3} |\psi(x)|^2 dx.$$

Собственная волновая функция, описывающая состояние частицы при $n = 3$ в потенциальном ящике, имеет вид

$$\psi_3(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{3\pi x}{l}\right). \quad (1)$$

С учётом (1) искомая вероятность:

$$w = \frac{2}{l} \int_{l/3}^{2l/3} \sin^2\left(\frac{3\pi x}{l}\right) dx.$$

Используя соотношение $\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\alpha)$, вычислим интеграл:

$$\begin{aligned} w &= \frac{1}{l} \int_{l/3}^{2l/3} dx - \frac{1}{l} \int_{l/3}^{2l/3} \cos\left(\frac{6\pi}{l}x\right) dx = \\ &= \frac{1}{l} \left[\frac{l}{3} - \frac{l}{6\pi} (\sin 4\pi - \sin 2\pi) \right] = 0,33. \end{aligned}$$

Заштрихованная на рис. 6.2 площадь численно равна вероятности обнаружения частицы в интервале $l/3 \leq x \leq 2l/3$.

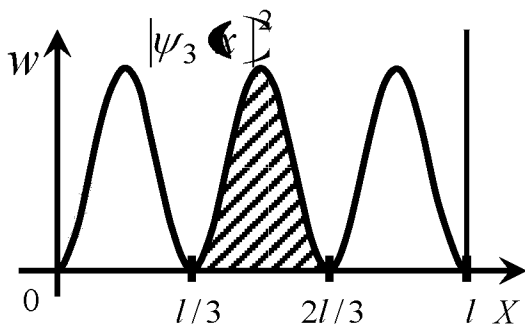


Рис. 6.2

Задача 6. Электрон с энергией $E = 4,9$ эВ движется вдоль оси OX и налетает на потенциальный барьер конечной ширины d и высотой $U = 5$ эВ. При какой ширине барьера вероятность W прохождения его электроном будет равна $0,2$?

Дано: $E = 4,9$ эВ, $U = 5$ эВ, $W = 0,2$.

Найти: d .

Решение. Вероятность W прохождения частицы через потенциальный барьер по своему физическому смыслу совпадает с коэффициентом прозрачности D ($W = D$). Тогда вероятность прохождения электроном потенциального барьера выразится соотношением

$$D \approx D_0 \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)} d \right], \quad (1)$$

где m – масса электрона.

Потенцируя выражение (1), получим: $\ln W = -\frac{2d}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)}$.

Отсюда $d = -\frac{\hbar \ln W}{2\sqrt{2m(U-E)}}$.

Входящие в эту формулу величины выразим в единицах СИ и произведем вычисления:

$$d = 4,95 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,495 \text{ нм}.$$

Учитывая, что формула (1) приближенная и вычисления носят оценочный характер, можно принять $d \approx 0,5$ нм.

Задача 7. Указать (с учётом принципа Паули), какое максимальное количество электронов N в атоме может иметь следующие одинаковые квантовые числа при $n = 2$: 1) n, l, m_l ; 2) m_l, m_s .

Дано: $n = 2$; 1) n, l, m_l ; 2) m_l, m_s .

Найти: N .

Решение. По принципу запрета Паули в атоме не может быть двух и более электронов с одинаковыми квантовыми числами.

Если три квантовых числа одинаковы, то электроны должны отличаться хотя бы спином (собственным механическим моментом импульса L_s), который может принимать для электронов только два

значения:

$$L_s = m_s \hbar, \text{ где } m_s = \pm 1/2.$$

Следовательно, в первом случае электронов с тремя одинаковыми квантовыми числами n, l, m_l может быть не более двух.

Во втором случае квантовому числу $n = 2$ соответствуют два значения азимутального квантового числа l (0 и 1). В свою очередь каждому l соответствует набор значений магнитного квантового числа m_l ($m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$). Следовательно, и для $l = 0$ и для $l = 1$ значение $m_l = 0$ является одинаковым. С учётом того, что спин электронов с таким набором квантовых чисел должен быть одинаков, получаем, что число таких электронов может быть также не более двух. Набор квантовых чисел для этих электронов:

$$\text{для 1-го: } 2, 0, 0, +1/2;$$

$$\text{для 2-го: } 2, 1, 0, +1/2.$$

Таким образом, $N = 2$.

Задача 8. При бомбардировке атомов неизвестного вещества дейтронами ${}^2_1\text{H}$ образуются две α -частицы ${}^4_2\text{He}$ и выделяется энергия $Q = 22,3$ МэВ. Определить массу атома этого вещества (в кг).

Дано: ${}^A_Z\text{X} + {}^2_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$, массы атомов приведены в табл. П8 приложения.

Найти: m_X .

Решение. Энергетический эффект ядерной реакции, выраженный в МэВ, можно найти из соотношения

$$Q = 931 \Delta m,$$

где Δm – дефект массы в а.е.м. (1 а.е.м. ≈ 931 МэВ), который представляет собой разность суммарных масс частиц, вступающих в реакцию $\sum m_1$ и полученных в результате этой реакции $\sum m_2$, выраженных также в а.е.м.

Обозначим неизвестный элемент через X и запишем выражение для дефекта массы ядерной реакции:

$$\Delta m = (m_X + m_H) - 2m_{\text{He}}.$$

Отсюда искомая величина, выраженная в а.е.м., имеет вид

$$m_X = 2m_{\text{He}} + \Delta m - m_H,$$

где $\Delta m = Q/931$.

Проведем вычисления, используя данные справочной табл. П8:

$$m_X = 2 \cdot 4,00260 + 22,3/931 - 2,01410 = 6,01512 \text{ а.е.м.}$$

или в килограммах

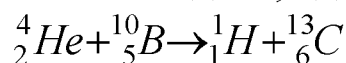
$$m_{\gamma} = 6,01512 \cdot 1,660 \cdot 10^{-27} = 9,9851 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Задача 9. При соударении α -частицы с ядром атома бора 1_5B произошла ядерная реакция, в результате которой образовались два новых ядра: ядро атома водорода 1_1H и ядро изотопа углерода ${}^{13}_6C$. Определить энергетический эффект этой реакции.

Дано: ${}^4_2He + {}^{10}_5B \rightarrow {}^1_1H + {}^{13}_6C$, массы атомов приведены в табл. П8.

Найти: Q .

Решение. Согласно условию задачи, ядерная реакция имеет вид



(α -частица представляет собой ядро атома гелия).

Энергетический эффект Q ядерной реакции определяется по формуле

$$Q = 931 \left[m_{He} + m_B - m_H - m_C \right]$$

При числовых подсчетах по этой формуле массы ядер заменяют массами нейтральных атомов, так как электронные оболочки ядер гелия и бора вместе содержат столько же электронов, сколько и электронные оболочки ядер углерода и водорода.

Подставив массы атомов в расчетную формулу, получим:

$$Q = 931((4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)) \text{ МэВ} = 4,06 \text{ МэВ.}$$

Энергия в результате реакции выделяется, так как $Q > 0$.

Задача 10. Определить начальную активность A_0 радиоактивного препарата магния ${}^{27}Mg$ массой $m = 0,2$ мкг, а также его активность A через $t = 10$ мин. Период полураспада магния считать известным.

Дано: $T_{1/2} = 600$ с, $m = 0,2$ мкг = $0,2 \cdot 10^{-6}$ кг, $t = 6$ ч = $2,16 \cdot 10^4$ с, $\mu = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Найти: $A_0, A(t)$.

Решение. Активность A изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа dN ядер, распавшихся за время dt к этому времени:

$$A = - dN/dt. \quad (1)$$

Знак « $-$ » показывает, что число N радиоактивных ядер с течением времени убывает.

Для нахождения dN/dt воспользуемся законом радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где N – число радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе в момент времени t ; N_0 – число ядер в момент времени, принятый за начальный ($t = 0$); λ – постоянная радиоактивного распада.

Продифференцируем выражение (2) по времени:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Сравнивая формулы (1) и (3), находим активность препарата в произвольный момент времени t :

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

где

$$A_0 = A(t = 0) = \lambda N_0 \quad (5)$$

– начальная активность препарата.

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (6)$$

Число N_0 радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, можно определить по формуле

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A, \quad (7)$$

где ν – количество вещества; m – масса изотопа; μ – молярная масса изотопа; N_A – постоянная Авогадро.

С учётом выражений (6) и (7) формулы (5) и (4) принимают вид

$$A_0 = \frac{m \ln 2}{\mu T_{1/2}} N_A; \quad A = \frac{m \ln 2}{\mu T_{1/2}} N_A e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}.$$

Вычисления:

$$A_0 = \frac{0,2 \cdot 10^{-9} \cdot 0,693}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк};$$

$$A = \frac{0,2 \cdot 10^{-9} \cdot 0,693}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} e^{-\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4} = 81,3 \text{ Бк}.$$

6.3. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 6

Номера вариантов и задач к контрольной работе

Вариант	Номер задачи									
0	610	620	630	640	650	660	670	680	690	600
1	601	611	621	631	641	651	661	671	681	691
2	602	612	622	632	642	652	662	672	682	692
3	603	613	623	633	643	653	663	673	683	693
4	604	614	624	634	644	654	664	674	684	694
5	605	615	625	635	645	655	665	675	685	695
6	606	616	626	636	646	656	666	676	686	696
7	607	617	627	637	647	657	667	677	687	697
8	608	618	628	638	648	658	668	678	688	698
9	609	619	629	639	649	659	669	679	689	699

601. Вычислить в соответствии с теорией Бора радиус r_2 второй боровской орбиты и скорость v_2 электрона на этой орбите для атома водорода.

602. Вычислить в соответствии с теорией Бора период T обращения и угловую скорость ω электрона в двухкратно ионизированном атоме лития, находящемся в возбуждённом состоянии, определяемом главным квантовым числом $n = 2$.

603. Электрон в атоме водорода находится в основном состоянии. Определить кинетическую T , потенциальную Π и полную энергии E электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

604. Электрон в однократно ионизированном атоме гелия находится на третьем энергетическом уровне. Определить кинетическую T , потенциальную Π и полную энергии E электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

605. Найти радиусы r_n трёх первых боровских орбит в атоме водорода и скорости v_n электрона на них.

606. Определить частоту и период обращения электрона на третьей боровской орбите в однократно ионизированном атоме гелия.

607. Найти первый потенциал U_i возбуждения и энергию ионизации E_i атома водорода.

608. Найти энергию ионизации E_i и потенциал ионизации ионов He^+ и Li^{++} .

609. Найти радиус r_1 первой боровской электронной орбиты для однократно ионизированного атома гелия и скорость электрона v_1 на ней.

610. Невозбуждённый двукратно ионизированный атом лития поглощает квант излучения с длиной волны $\lambda = 102,6$ нм. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус r_n и номер n электронной орбиты возбуждённого двукратно ионизированного атома лития.

611. Найти наибольшую λ_{\max} и наименьшую λ_{\min} длины волн в первой инфракрасной серии водорода (серия Пашена).

612. Определить энергию фотона, испускаемого двукратно ионизированным атомом лития при переходе электрона со второй орбиты на первую.

613. Определить максимальную и минимальную энергии фотонов серии Лаймана в спектре излучения атомарного водорода.

614. Определить максимальную энергию фотона серии Бальмера в спектре излучения атомарного водорода.

615. В однозарядном ионе гелия электрон перешел со второго энергетического уровня на первый. Определить длину волны фотона, излучённого ионом гелия.

616. Фотон выбивает из однократно ионизированного атома гелия, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией $T = 10$ эВ. Определить энергию и длину волны фотона.

617. Фотон с энергией $E = 120$ эВ выбил электрон из невозбуждённого двукратно ионизированного атома лития. Какую скорость будет иметь электрон вдали от ядра атома?

618. Определить минимальную энергию фотона серии Бальмера в спектре излучения атомарного водорода.

619. Какому элементу принадлежит водородоподобный спектр, линиям которого соответствуют длины волн в четыре раза меньше, чем длины волн, соответствующие линиям спектра атомарного водорода?

620. Определить наибольшую λ_{\max} и наименьшую λ_{\min} длины волн в видимой области спектра атомарного водорода (серия Бальмера).

621. Определить длину волны λ_B де Бройля для частицы массой $m = 1$ г, движущейся со скоростью $v = 10$ м/с.

622. Вычислить длину волны λ_B де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией $T = 13,6$ эВ. Сравнить

полученное значение λ с диаметром d атома водорода (найти отношение λ/d). Нужно ли учитывать волновые свойства электрона при изучении движения электрона в атоме водорода? Диаметр атома водорода принять равным удвоенному значению первого боровского радиуса.

623. Кинетическая энергия T нейтрона равна утроенному значению его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля λ_B для такого нейтрона.

624. Дейтрон обладает кинетической энергией $T = 10$ МэВ. Определить величину дополнительной энергии ΔT , которую необходимо ему сообщить для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась в пять раз.

625. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти протон, чтобы дебройлевская длина волны λ была равна: 1) 1 нм; 2) 1 пм?

626. Вычислить длину волны де Бройля λ_B для протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U , равную: 1) 1 МВ; 2) 1 ГВ.

627. Протон обладает кинетической энергией $T = 1$ кэВ. Определить величину дополнительной энергии ΔT , которую необходимо ему сообщить для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась в три раза.

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

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

630. Кинетическая энергия T электрона равна удвоенному значению его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля λ_B для такого электрона.

631. Используя соотношение неопределённостей, оценить наименьшие неточности Δp в определении импульсов электрона и протона, если координаты центра масс каждой из этих частиц могут быть установлены с неопределённостью $\Delta x = 0,01$ мм.

632. Атом излучил фотон с длиной волны $\lambda = 800$ нм. Продолжительность излучения $\tau = 10$ нс. Определить наибольшую точность ($\Delta\lambda$), с которой может быть измерена длина волны

излучения.

633. Используя соотношение неопределённостей, оценить ширину l одномерного потенциального ящика, в котором минимальная энергия E_{\min} электрона равна 10 эВ.

634. В одномерном потенциальном ящике находится α -частица. Используя соотношение неопределённостей, оценить ширину l этого ящика, если известно, что минимальная энергия α -частицы $E_{\min} = 8$ эВ.

635. Определить неточность Δx в определении координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью $v = 1,5 \cdot 10^6$ м/с, если допустимая неточность Δv в определении скорости составляет $\beta = 10\%$ от её величины. Сравнить полученную неточность с диаметром d атома водорода, вычисленным согласно теории Бора для основного состояния, и указать, применимо ли понятие траектории к движению электрона в данном случае.

636. Электрон с кинетической энергией $T = 15$ эВ находится в металлической пылинке диаметром $d = 1$ мкм. Определить относительную неточность, с которой может быть определена скорость электрона.

637. Во сколько раз дебройлевская длина волны λ_B частицы меньше неопределённости Δx её координаты, которая соответствует относительной неопределённости импульса $\beta = 1\%$.

638. Используя соотношение неопределённостей $\Delta x \Delta p \geq h/2$, оценить низший энергетический уровень электрона в атоме водорода. Принять линейные размеры атома $l = 0,1$ нм.

639. Предполагая, что неопределённость координаты Δx движущейся частицы равна дебройлевской длине волны, определить относительную неточность $\Delta p/p$ определения импульса этой частицы.

640. Используя соотношение неопределённостей, оценить кинетическую энергию нуклона в ядре, полагая радиус ядра равным $R = 10^{-12}$ см.

641. Частица находится в одномерном потенциальном ящике. Найти отношение разности соседних энергетических уровней $\Delta E_{n+1,n}$ к энергии E_n частицы в трёх случаях: 1) $n = 3$, 2) $n = 10$, 3) $n \rightarrow \infty$. Пояснить полученные результаты.

642. Частица в одномерном потенциальном ящике шириной l находится в возбуждённом состоянии ($n = 2$). Определить, в каких

точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности нахождения частицы максимальна и минимальна.

643. Электрон находится в одномерном потенциальном ящике шириной l . В каких точках в интервале ($0 < x < l$) плотность вероятности нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одинакова? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение пояснить графически.

644. Частица в одномерном потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружить частицу: 1) в средней трети ящика; 2) в крайней правой трети ящика?

645. В одномерном потенциальном ящике шириной l находится электрон. Вычислить вероятность w обнаружения электрона на первом энергетическом уровне в интервале $l/4$, равноудалённом от стенок ящика.

646. Вычислить отношение вероятностей w_1/w_2 нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях в интервале $l/5$, равноудалённом от стенок одномерного потенциального ящика шириной l .

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

648. Электрон находится в одномерном потенциальном ящике шириной l . В каких точках в интервале ($0 < x < l$) плотность вероятности нахождения электрона на втором и третьем энергетических уровнях одинакова?

649. Частица в одномерном потенциальном ящике шириной l находится в возбуждённом состоянии ($n = 3$). Определить, в каких точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности нахождения частицы максимальна и минимальна.

650. В одномерном потенциальном ящике шириной l находится электрон в возбуждённом состоянии ($n = 2$). Какова вероятность обнаружения электрона в интервале $l/3$, равноудалённом от стенок ящика?

651. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $d = 0,1$ нм. При какой разности энергий ($U - E$) вероятность прохождения электрона через барьер равна $0,8$?

652. Протон и электрон, обладая одинаковой энергией, движутся вдоль оси Ox и встречают прямоугольный потенциальный барьер.

Определите, во сколько раз надо сузить потенциальный барьер, чтобы вероятность прохождения его протоном была равна вероятности прохождения электроном.

653. Электрон с энергией $E = 4$ эВ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10$ эВ и шириной $l = 0,1$ нм. Определить коэффициент прозрачности потенциального барьера.

654. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $l = 0,1$ нм. Определить в электрон-вольтах разность энергий $U - E$, при которой вероятность прохождения электрона через барьер составит 0,5.

655. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $l = 0,1$ нм. Разность между высотой потенциального барьера и энергией движущегося в положительном направлении оси x электрона $U - E = 5$ эВ. Определить, во сколько раз изменится коэффициент прозрачности D потенциального барьера для электрона, если разность $U - E$ возрастёт в 4 раза.

656. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $l = 0,1$ нм. При какой разности энергий $U - E$ вероятность прохождения электрона через барьер равна 0,8?

657. Электрон с энергией $E = 100$ эВ проходит через прямоугольный потенциальный барьер шириной $l = 0,5$ нм. Высота барьера U больше энергии E электрона на $\beta = 1\%$. Вычислить коэффициент прозрачности барьера.

658. При какой ширине l прямоугольного потенциального барьера коэффициент прозрачности D для электронов равен 0,01? Разность энергий $U - E = 10$ эВ.

659. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $l = 0,2$ нм. Разность энергий $U - E = 1$ эВ. Во сколько раз изменится вероятность w прохождения электрона через барьер, если разность энергий возрастет в $n = 10$ раз?

660. Протон и электрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi = 10$ кВ. Во сколько раз отличаются коэффициенты прозрачности для электрона D_e и для протона D_p , если высота барьера $U = 20$ кэВ и ширина $l = 0,1$ пм?

661. Вычислить момент импульса L орбитального движения электрона, находящегося в атоме: 1) в s -состоянии; 2) в p -состоянии.

662. Определить возможные значения проекции момента

импульса L_z орбитального движения электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля. Электрон находится в d -состоянии.

663. Электрон находится в атоме в f -состоянии. Найти орбитальный момент импульса L электрона и максимальное значение проекции момента импульса L_z на направление внешнего магнитного поля.

664. Какое максимальное число s -, p - и d -электронов может находиться в электронных К-, L- и M-оболочках атома соответственно?

665. Указать (с учётом принципа Паули), какое максимальное число электронов в атоме может иметь следующие одинаковые квантовые числа: 1) n ; 2) n, l, m_l .

666. Заполненный электронный слой характеризуется квантовым числом $n = 3$. Указать, какое число s -, p -, d -электронов находится в этом слое.

667. Указать (с учётом принципа Паули), какое максимальное количество электронов в атоме может иметь следующие одинаковые квантовые числа: 1) n и l ; 2) n, l, m_l, m_s .

668. Заполненная электронная оболочка характеризуется квантовым числом $n = 2$. Указать число электронов в этой оболочке, которые имеют следующие одинаковые квантовые числа: 1) $m_s = \pm 1/2$; 2) $m_l = 2$; 3) $m_s = -1/2$ и $m_l = 0$.

669. Заполненная электронная оболочка характеризуется квантовым числом $n = 3$. Указать число электронов в этой оболочке, которые имеют следующие одинаковые квантовые числа: 1) $m_l = -2$; 2) $m_s = 1/2$ и $m_l = 1$; 3) $m_s = -1/2$ и $l = 2$.

670. Найти число электронов в атомах, у которых в невозбужденном состоянии заполнены: 1) К- и L-оболочки, $3s$ -подоболочка; 2) К-, L-оболочка, $3s$ -подоболочка и наполовину $3p$ -подоболочка. Указать, каким элементам периодической системы Менделеева принадлежат эти атомы?

671. Определить энергию, которую необходимо затратить, чтобы оторвать один протон от ядра атома ${}^3_2\text{He}$.

672. Определить энергию связи и удельную энергию связи ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$.

673. Определить энергию связи и удельную энергию связи ядра атома азота ${}^{14}_7\text{N}$.

674. Определить энергию, которую необходимо затратить, чтобы оторвать один нейтрон от ядра атома $^{17}_8\text{O}$.

675. Энергия связи $E_{св}$ ядра, состоящего из трёх протонов и четырех нейтронов, равна 39,3 МэВ. Определить массу m нейтрального атома, обладающего этим ядром.

676. Определить энергию связи и удельную энергию связи ядра атома бериллия $^{13}_6\text{C}$.

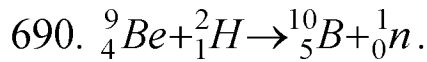
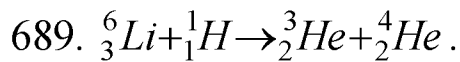
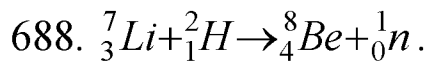
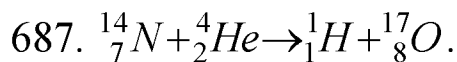
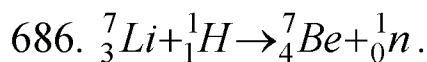
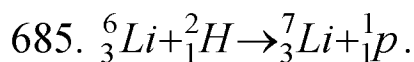
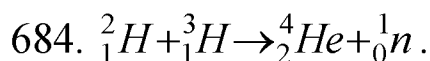
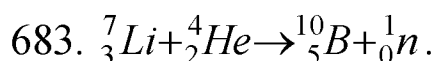
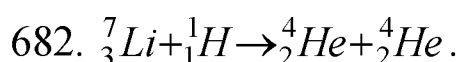
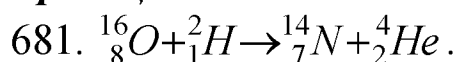
677. Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре атома кислорода $^{16}_8\text{O}$.

678. Определить энергию связи ядер: а) ^7_3Li ; б) ^7_4Be . Какое из этих ядер более устойчиво?

679. Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядрах: а) $^{10}_5\text{B}$; б) $^{14}_6\text{C}$. Какое из этих ядер более устойчиво?

680. При бомбардировке изотопа лития ^6_3Li дейтронами ^2_1H образуются две α -частицы. При этом выделяется энергия $Q = 22,3$ МэВ. Зная массы дейтрона и α -частицы, найти массу m изотопа лития ^6_3Li .

681 – 690. Вычислить энергию (тепловой эффект) ядерной реакции и указать, освобождается или поглощается энергия при этой реакции.



691. Найти период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа, если его активность за время $t = 10$ суток уменьшилось на 24% по

сравнению с первоначальной.

692. Определить, какая доля радиоактивного изотопа ${}_{89}^{225}\text{Ac}$ распадается за время $t = 6$ суток.

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

694. Определить массу m изотопа ${}_{53}^{131}\text{I}$, имеющего активность $A = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

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

696. 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 $T_{1/2}$ полураспада изотопа.

697. Во сколько раз уменьшится активность препарата ${}_{15}^{32}\text{P}$ через время $t = 20$ суток?

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

699. Определить число N ядер, распавшихся в радиоактивном изотопе фосфора ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ массой $m = 1$ кг в течение времени: 1) $t = 1$ мин; 2) $t = 5$ суток.

700. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Уравнение плоской гармонической волны. Частота, волновой вектор, фазовая скорость.
2. Волновое уравнение.
3. Энергия упругой волны. Вектор Пойнтинга.
4. Уравнение сферической гармонической волны.
5. Интерференция механических волн. Стоячая волна.
6. Электромагнитные волны. Их свойства.
7. Закон сохранения энергии в электромагнитной волне. Плотность потока энергии электромагнитного поля.
8. Световая волна. Показатель преломления. Интенсивность света. Импульс световой волны.
9. Закон преломления и отражения волн. Амплитуда и фаза электромагнитной волны при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков.
10. Принцип Гюйгенса. Фронт волны.
11. Наложение световых волн. Интерференция света. Условия максимума и минимума при интерференции. Когерентность волны.
12. Интерференция двух когерентных монохроматических волн от двух щелевых источников. Особенности интерференционной картины.
13. Интерференция света в тонких плёнках. Полосы равного наклона и равной толщины.
14. Интерференция света от пластин переменной толщины. Кольца Ньютона.
15. Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля.
16. Метод зон Френеля. Свойства зон Френеля.
17. Дифракция Френеля от простейших препятствий (круглого отверстия и диска).
18. Дифракция Фраунгофера от щели. Условия главных максимумов и минимумов. Распределение интенсивности света на дифракционной картине.
19. Дифракционная решетка. Условия главных максимумов и минимумов. Распределение интенсивности света на дифракционной картине.
20. Разрешающая способность, угловая и линейная дисперсии дифракционной решетки.
21. Дифракция рентгеновских лучей на трехмерных структурах.

22. Поляризация света. Виды поляризованных волн. Поляризатор. Закон Малюса.
23. Поляризация света при его отражении и преломлении на диэлектрической границе. Закон Брюстера.
24. Двойное лучепреломление. Объяснение на основе волновых представлений.
25. Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсии. Связь групповой и фазовой скоростей при наличии дисперсии.
26. Объяснение дисперсии света на основе классической электронной теории. Поглощение света.
27. Тепловое излучение. Его основные характеристики. Спектр теплового излучения абсолютно черного тела. Формула Планка.
28. Законы теплового излучения как следствие формулы Планка.
29. Фотоэффект и его закономерности.
30. Эффект Комптона.
31. Тормозное рентгеновское излучение. Коротковолновая граница. Фотоны. Опыт Боте. Давление света.
32. Гипотеза де Бройля о двойственной природе микрочастиц. Волновые свойства микрочастиц и их опытное обоснование.
33. Вероятностное описание состояния микрочастиц. Волновая функция. Стандартные требования, накладываемые на волновую функцию.
34. Соотношение неопределённостей Гейзенберга.
35. Уравнение Шрёдингера. Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний.
36. Стационарное уравнение Шрёдингера. Движение свободной микрочастицы.
37. Стационарное уравнение Шрёдингера. Частица в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками. Квантование энергии.
38. Стационарное уравнение Шрёдингера. Прохождение квантовой частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект.
39. Стационарное уравнение Шрёдингера. Поведение квантовой частицы на скачке потенциала.
40. Развитие представлений о структуре и строении атома. Теория Бора для водородоподобных систем.
41. Квантовая модель атома водорода. Квантование энергии и момента импульса электрона. Квантовые числа.
42. Сравнение квантовой и боровской моделей атома водорода.

43. Спин электрона и опытное обоснование его существования. Принцип Паули. Периодическая система элементов Менделеева.
44. Принцип неразличимости тождественных микрочастиц. Распределение микрочастиц по состояниям. Распределения Ферми – Дирака и Бозе – Эйнштейна.
45. Элементы зонной теории. Основные приближения, используемые в зонной теории твёрдого тела.
46. Зонный характер энергетического спектра электронов в кристаллах.
47. Классификация кристаллов на основе зонной теории.
48. Ядро атома. Основные характеристики нуклонов и ядер. Изотопы. Энергия связи. Понятие о ядерных силах.
49. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Типы радиоактивного распада.
50. Понятие о ядерных реакциях. Законы сохранения в ядерных реакциях.
51. Элементарные частицы. Классификация элементарных частиц.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные физические константы

Ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Гравитационная постоянная $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

Число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Заряд электрона $e = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Заряд протона $q = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Скорость света в вакууме $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Постоянная закона Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Постоянная закона смещения Вина $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Постоянная Ридберга (для атома водорода ${}^1_1\text{H}$) $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Радиус первой боровской орбиты $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Магнетон Бора $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Комптоновская длина волны электрона $\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.

Атомная единица массы $1 \text{ а.е.м} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Коэффициент пропорциональности между энергией и массой $c^2 = 9,00 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг} = 931 \text{ МэВ/а.е.м}$.

Таблица П1

Свойства некоторых твёрдых тел

Вещество	Плотность, $\times 10^3$ кг/м ³	Температура плавления, °С	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, $\times 10^5$ Дж
Алюминий	2,70	659	896	3,22
Медь	8,93	1100	395	1,76
Свинец	11,3	327	126	0,226
Серебро	10,5	960	234	0,88
Сталь	7,7	1400	460	0,8
Чугун	7,88	1150	503	1,2
Лёд	0,9	0	2100	3,35

Таблица П2

Свойства некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность, $\times 10^3$ кг/м ³	Удельная теплоёмкость при 20°С, Дж/(кг·К)	Удельная теплота парообразования, МДж/кг
Вода	1,00	4190	2,26
Керосин	0,80	2140	0,22
Бензин	0,79	2040	0,250
Ртуть	13,6	138	0,285
Спирт	0,80	2510	0,924

Таблица П3

Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность, кг/м ³	Газ	Плотность, кг/м ³
Водород	0,09	Гелий	0,18
Воздух	1,29	Кислород	1,43

Таблица П4

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Парафин	2,0	Эбонит	3,0
Стекло	7,0	Масло	2,2
Фарфор	5,0	Слюда	7,0

Таблица П5

Показатель преломления прозрачных диэлектриков

Вещество	Показатель преломления	Вещество	Показатель преломления
Вода, мыльная плёнка	1,33	Стекло	1,5
Глицерин	1,47	Алмаз	2,42

Таблица П6

Работа выхода электронов

Металл	Дж	эВ	Металл	Дж	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

Таблица П7

Масса и энергия покоя некоторых элементарных частиц

Частица	m_0		E_0	
	$\times 10^{-27}$, кг	а.е.м.	$\times 10^{-10}$, Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-4}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-4}$	0,511
Протон	1,672	1,00728	$1,50 \cdot 10$	938
Нейтрон	1,675	1,00867	1,5	939
Дейтрон	3,35	2,01355	3,00	1876
α -частица	6,64	4,00149	5,96	3733
Нейтральный π -мезон	0,241	0,14498	0,216	135

Таблица П8

Массы нейтральных атомов

Изотоп	Символ	m , а.е.м.	Изотоп	Символ	m , а.е.м.
Водород	1_1H	1,00783	Бор	${}^{10}_5B$	10,01294
	2_1H	2,01410		${}^{11}_5B$	11,00930
	3_1H	3,01605	Углерод	${}^{12}_6C$	12,00000
Гелий	3_2He	3,01603		${}^{13}_6C$	13,00335
	4_2He	4,00260		${}^{14}_6C$	14,00324
Литий	6_3Li	6,01513	Азот	${}^{13}_7N$	13,00574
	7_3Li	7,01601		${}^{14}_7N$	14,00307
Бериллий	7_4Be	7,01693		${}^{15}_7N$	15,00011
	8_4Be	8,00531	Кислород	${}^{16}_8O$	15,99491
	9_4Be	9,01219		${}^{17}_8O$	16,99913

Таблица П9

Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	$T_{1/2}$	Изотоп	Символ	$T_{1/2}$
Магний	${}^{27}_{12}Mg$	10 мин	Иридий	${}^{192}_{77}Ir$	75 сут
Радон	${}^{222}_{86}Rn$	3,8 сут	Церий	${}^{144}_{58}Ce$	285 сут
Йод	${}^{131}_{53}I$	8 сут	Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 года
Актиний	${}^{225}_{89}Ac$	10 сут	Стронций	${}^{90}_{38}Sr$	27 лет
Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 сут	Радий	${}^{226}_{86}Ra$	1620 лет

Таблица П10

Энергия ионизации некоторых атомов

Вещество	E_i , Дж	E_i , эВ	Вещество	E_i , Дж	E_i , эВ
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6	Литий	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6	Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

Таблица П11

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

Приставка		Множитель	Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение	
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пэта	П	10^{15}	санτι	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	де	10^1	атто	а	10^{-18}

Таблица П12

Некоторые математические формулы

$\frac{d}{dx} (x^n) = nx^{n-1}$	$\frac{d}{dx} (e^x) = e^x$	$\frac{d}{dx} (\ln x) = \frac{1}{x}$
$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2}$	$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x^n}\right) = -\frac{n}{x^{n+1}}$	$\frac{d}{dx} (e^{ax}) = ae^{ax}$
$\frac{d}{dx} (a^x) = a^x \ln a $	$(uv)' = u'v + v'u$	$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - v'u}{v^2}$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x + const$	$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x} + const$	$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + const$
$\int_a^b x dx = \frac{1}{2} x^2 \Big _a^b = \frac{1}{2} (b^2 - a^2)$	$\ln a + \ln b = \ln(ab)$	$\ln a - \ln b = \ln\left(\frac{a}{b}\right)$

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Общие методические указания	4
Рабочая программа по физике на четвёртый семестр	8
Библиографический список	11
РАЗДЕЛ 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА	
5.1. Основные законы и соотношения	12
5.2. Примеры решения задач	27
5.3. Контрольная работа № 5.....	38
РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ	
6.1. Основные законы и соотношения	50
6.2. Примеры решения задач	59
6.3. Контрольная работа № 6.	68
Вопросы для самоконтроля	77
ПРИЛОЖЕНИЕ	80

ПРИМЕЧАНИЯ

Арзуманян Грайр Вагаршакович
Гатько Людмила Евстафьевна
Третьякова Алина Васильевна
Фатеева Валентина Афанасьевна
Чилингарова Нарина Сароевна

**Учебно-методическое пособие и
контрольные задания по физике**

Часть 3

Для студентов всех инженерных специальностей
факультета безотрывной формы обучения

Ответственный за выпуск Арзуманян Г.В.
Редактор Маныч Э.И.
Корректор Маныч Э.И.

ЛР № 020565 от 23. 06. 1997г. Подписано к печати 2011г.
Формат 60×84 ¹/₁₆ . Бумага офсетная. Офсетная печать.
Усл. п.л. – 5,4. Уч.-изд. л. – 5,2.
Заказ № . Тираж 200 экз.

«С»

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1