www.reshuzadachi.ru

Ф И З И К А

УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

ЧАСТЬ 2
ОПТИКА. КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА. ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

МИНСК 2008

сайт контрольных работ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«МИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ВЫСШИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПОДЛЕЖИТ ВОЗВРАТУ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ В. И. Федосенко
« 09 » июля 2008 г.

Ф И З И К А

Учебная программа, методические указания
и контрольные задания
для учащихся безотрывной формы обучения специальностей
2-25 01 10 «Коммерческая деятельность»,
2-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств», 2-39 02 31 «Техническая эксплуатация радиоэлектронных средств», 2-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий», 2-40 02 02 «Электронные вычислительные средства»

В двух частях

ЧАСТЬ 2
ОПТИКА. КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА. ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

МИНСК 2008

УДК 531(075)
ББК 22.3
Ф50

Рекомендовано к изданию кафедрой естественнонаучных дисциплин (протокол № 8 от 27.02.2008 г.) и Научно-методическим советом Учреждения образования «Минский государственный высший радиотехнический колледж» (протокол № 8 от 16.04.2008 г.)

С о с т а в и т е л и :
А. Н. Тараканов, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин МГВРК, канд. физ.-мат. наук, доцент
А. И. Болсун, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин МГВРК, канд. физ.-мат. наук, доцент
Л. В. Сологуб, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин МГВРК, канд. физ.-мат. наук

Р е ц е н з е н т
Е. М. Храмович, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин МГВРК, канд. физ.-мат. наук, доцент

Ф50 **Физика** : учеб. программа, метод. указания и контрол. задания для учащихся безотрыв. формы обучения специальностей 2-25 01 10 «Коммерческая деятельность», 2-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств», 2-39 02 31 «Техническая эксплуатация радиоэлектронных средств», 2-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий», 2-40 02 02 «Электронные вычислительные средства» : в 2 ч. / сост. А. Н. Тараканов, А. И. Болсун. – Мн. : МГВРК, 2007–2008.
ISBN 978-985-6851-17-2
Ч. 2 : Оптика. Квантовая и атомная физика. Молекулярная физика и термодинамика. Основы ядерной физики и физики элементарных частиц / сост. А. Н. Тараканов, А. И. Болсун, Л. В. Сологуб. – Мн. : МГВРК, 2008. – 90 с.
ISBN 978-985-6851-56-1 (ч. 2)

Пособие содержит учебную программу предмета, методические указания по выполнению и оформлению контрольной работы, варианты контрольной работы, вопросы для самоконтроля, список рекомендуемой литературы.
Предназначено для учащихся и преподавателей колледжа.

УДК 531(075)
ББК 22.3

ISBN 978-985-6851-56-1 (ч. 2)
ISBN 978-985-6851-17-2

© Тараканов А. Н., Болсун А. И., Сологуб Л. В., составление, 2008
© Оформление. Учреждение образования «Минский государственный высший радиотехнический колледж», 2008

Предисловие

Данное методическое пособие является логическим продолжением пособия: Физика : учеб. программа, метод. указания и контрол. задания для учащихся безотрыв. формы обучения специальностей 2-25 01 10 «Коммерческая деятельность», 2-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств», 2-39 02 31 «Техническая эксплуатация радиоэлектронных средств», 2-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий», 2-40 02 02 «Электронные вычислительные средства» : в 2. ч. Ч. 1. Механика. Электродинамика. Механические и электромагнитные колебания и волны / сост. А. Н. Тараканов, А. И. Болсун. – Мн. : МГВРК, 2007.

Во второй части пособия рассматриваются следующие разделы физики: Оптика. Квантовая и атомная физика. Молекулярная физика и термодинамика. Основы ядерной физики и элементарных частиц. Изучение этих разделов курса физики предусмотрено в объеме 140 часов.

Приложение А содержит некоторые справочные данные, необходимые при изучении разделов предмета и решении задач контрольной работы.

1. Учебная программа

1.1. Примерный тематический план

Т а б л и ц а 1.1

Наименование раздела и темы	Количество часов					
	Дневная форма обучения			Безотрывная форма обучения		
	Всего	Теория	Лаб/Прт	Всего	Теория	Лаб/Прт
РАЗДЕЛ 5. **Оптика**						
5.1. Электромагнитная природа света. Элементы фотометрии	8	8	–	2	1	–
5.2. Геометрическая оптика	14	12	2	3	2	2
5.3. Интерференция света	12	10	2	3	1	2

Окончание табл. 1.1

Наименование раздела и темы	Количество часов					
	Дневная форма обучения			Безотрывная форма обучения		
	Всего	Теория	Лаб/Прт	Всего	Теория	Лаб/Прт
5.4. Дифракция света	10	8	2	3	2	2
5.5. Поляризация света. Распространение света в веществе. Дисперсия, поглощение и рассеяние света	10	10	2	2	1	–
Итого	54	48	8	13	7	6
РАЗДЕЛ 6. **Квантовая и атомная физика**						
6.1. Квантовая природа излучения. Фотоны. Волновые свойства микрочастиц	12	12	–	2	2	–
6.2. Квантовые постулаты Бора и строение атома	10	10	2	3	1	2
Итого	22	22	2	5	3	2
РАЗДЕЛ 7. **Молекулярная физика и термодинамика**						
7.1. Основы молекулярно-кинетической теории	10	10	–	2	2	–
7.2. Законы идеальных газов	12	8	2	3	1	2
7.3. Основы термодинамики	12	10	–	2	2	2
7.4. Агрегатные состояния вещества и фазовые переходы	10	8	2	3	1	2
Итого	44	36	4	10	6	6
РАЗДЕЛ 8. **Основы ядерной физики и физики элементарных частиц**						
8.1. Структура атомного ядра. Ядерные реакции и радиоактивность. Деление и синтез ядер	10	8	2	4	1	2
8.2. Элементарные частицы и их свойства	10	10	–	2	1	–
Итого	20	18	2	6	2	2
Всего за II семестр	140	124	16	34	18	16
Всего за весь курс	280	246	34	74	40	34

1.2. Содержание предмета

РАЗДЕЛ 5. **ОПТИКА**

ТЕМА 5.1. **Электромагнитная природа света. Элементы фотометрии**

Шкала электромагнитных волн. Электромагнитная природа света. Скорость света. Опыты по измерению скорости света. Зависимость между длиной световой волны и частотой электромагнитных колебаний. Энергия электромагнитного излучения, световой поток, интенсивность излучения, светимость и освещенность. Законы освещенности.

ТЕМА 5.2. **Геометрическая оптика**

Законы отражения и преломления света. Физический смысл показателя преломления. Полное отражение света. Плоские и сферические зеркала. Формула сферического зеркала. Линзы. Фокусное расстояние, оптическая сила и увеличение линзы. Формула тонкой линзы. Оптические приборы. Ход лучей в микроскопе и телескопе.

ТЕМА 5.3. **Интерференция света**

Монохроматический и немонохроматический свет. Когерентные и некогерентные источники света. Оптическая длина пути и оптическая разность хода. Интерференция света от двух когерентных источников. Интерференция света в тонких пленках. Применение интерференции в технике.

ТЕМА 5.4. **Дифракция света**

Принцип Гюйгенса–Френеля. Дифракция света. Дифракция на щели в параллельных лучах. Дифракция на дифракционной решетке. Дифракционный спектр. Понятие о голографии.

ТЕМА 5.5. **Поляризация света. Распространение света в веществе. Дисперсия, поглощение и рассеяние света**

Естественный и поляризованный свет. Поляризации света. Степень поляризации. Закон Малюса. Закон Брюстера. Оптиче-

ские свойства кристаллов. Двойное лучепреломление. Дисперсия света. Разложение белого света призмой. Виды спектров. Спектры поглощения и испускания. Фраунгоферовы линии поглощения в спектрах Солнца и звезд. Спектральный анализ и спектральные приборы. Рассеяние света.

РАЗДЕЛ 6. **КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА**

ТЕМА 6.1. **Квантовая природа излучения. Фотоны. Волновые свойства микрочастиц**

Излучение энергии нагретыми телами. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа. Энергетическая светимость абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Закон Стефана–Больцмана.

Гипотеза Планка о квантовании энергии. Постоянная Планка. Корпускулярные свойства света. Фотоны. Энергия и импульс фотона. Давление света. Фотоэффект. Законы фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Применение фотоэффекта в технике. Эффект Комптона. Корпускулярно-волновой дуализм. Длина волны де Бройля. Соотношение неопределенностей.

ТЕМА 6.2. **Квантовые постулаты Бора и строение атома**

Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома. Квантовые постулаты Бора. Модель атома водорода. Испускание и поглощение света атомами. Непрерывный и линейчатый спектры. Вынужденное излучение. Квантовые генераторы. Лазеры и их применение.

РАЗДЕЛ 7. **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

ТЕМА 7.1. **Основы молекулярно-кинетической теории**

Основные положения молекулярно-кинетической теории и их опытное обоснование. Структура, масса и размеры молекул. Хаотическое движение и взаимодействие молекул. Броуновское движение. Диффузия. Скорость молекул вещества. Температура и ее измерение. Абсолютная шкала температур. Тепловое расширение твердых тел, жидкостей и газов. Давление газа с точки зрения кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Среднеквадратичная скорость молекул

вещества. Барометрическая формула.

ТЕМА 7.2. **Законы идеальных газов**

Идеальный газ. Давление, температура и объем идеального газа. Уравнение состояния Клапейрона–Менделеева. Универсальная газовая постоянная. Изотермический, изобарический и изохорный процессы в идеальном газе. Смеси идеальных газов. Закон Дальтона.

ТЕМА 7.3. **Основы термодинамики**

Внутренняя энергия. Термодинамическая работа и количество теплоты. Первое начало термодинамики – закон сохранения энергии в тепловых процессах. Теплоемкость и удельная теплоемкость. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам в идеальном газе. Адиабатический процесс.

Необратимость тепловых процессов. Второе начало термодинамики. Принцип действия тепловых двигателей. КПД теплового двигателя.

ТЕМА 7.4. **Агрегатные состояния вещества и фазовые переходы**

Газообразное, жидкое и твердое агрегатные состояния вещества. Фазовые переходы. Испарение жидкостей и конденсация газов. Удельная теплота парообразования и конденсации. Кипение. Зависимость температуры кипения жидкости от давления. Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажность воздуха. Точка росы.

Плавление твердых тел и кристаллизация жидкостей. Удельная теплота плавления и кристаллизации. Удельная теплота сгорания.

Количество теплоты при фазовых переходах. Уравнение теплового баланса.

Поверхностные явления в жидкостях. Поверхностное натяжение. Смачивание. Капиллярные явления.

Кристаллические и аморфные тела. Дефекты в кристаллах. Механические свойства твердых тел и материалов: упругость, прочность, пластичность. Упругие деформации.

РАЗДЕЛ 8. **ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

ТЕМА 8.1. **Структура атомного ядра. Ядерные реакции и радиоактивность. Деление и синтез ядер**

Строение атомного ядра. Ядерные силы. Изотопы. Энергия связи и дефект масс. Спектр энергетических состояний атомного ядра. Ядерные спектры. Гамма-излучение. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Альфа- и бета-распад. Нейтрино. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Энергетический выход ядерных реакций. Деление ядер. Цепная реакция. Ядерный реактор. Синтез ядер. Термоядерная реакция. Методы регистрации заряженных частиц и ионизирующих излучений. Ядерная энергетика и ее экологические аспекты. Биологическое воздействие радиации. Понятие о дозе облучения и радиационной безопасности.

ТЕМА 8.2. **Элементарные частицы и их свойства**

Элементарные частицы. Наблюдение элементарных частиц в космических лучах. Характеристики и основные свойства элементарных частиц. Классификация элементарных частиц. Спектр масс элементарных частиц. Фермионы и бозоны. Лептоны и адроны. Мезоны, гипероны, резонансы. Частицы и античастицы и их аннигиляция. Стабильность частиц и превращения элементарных частиц. Типы физических взаимодействий в природе. Законы сохранения в микромире. Кварки и глюоны – структурные составляющие элементарных частиц. Роль элементарных частиц в эволюции Вселенной.

2. Вопросы для самоконтроля

РАЗДЕЛ 5. **ОПТИКА**

1. К какой области спектра длин волн относятся световые явления? Каковы длины волн для красного и фиолетового цветов?
2. Чему равно численное значение скорости света в вакууме?
3. Что изучает фотометрия?
4. Что такое интенсивность излучения, световой поток, светимость, освещенность и каковы их физические размерности?
5. В чем заключается критерий применимости геометрической оптики?
6. Дайте определение абсолютного и относительного показателей преломления среды.
7. Какие среды называются оптически однородными?
8. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
9. При каком условии угол преломления света больше угла падения?
10. В каком случае имеет место полное отражение света?
11. Какое наименьшее число лучей необходимо брать для построения изображения точки в линзах? Укажите эти лучи.
12. Какие нарушения законов геометрической оптики возникают в толстых линзах?
13. Какие волны называются когерентными?
14. Как можно получить когерентные световые волны?
15. Что такое оптическая длина пути и оптическая разность хода?
16. Чем отличаются оптическая длина пути и оптическая разность хода лучей от геометрической длины пути и геометрической разности хода лучей?
17. Каковы условия, необходимые для наблюдения интерференции света?
18. Запишите условия усиления и ослабления результирующих световых колебаний при интерференции.
19. Сформулируйте принцип Гюйгенса–Френеля.
20. Что представляет собой дифракционная решетка?
21. Почему при освещении дифракционной решетки белым светом дифракционный максимум нулевого порядка является белым, а для остальных порядков он разлагается в спектр? Лучи какого цвета ближе к нулевому максимуму?
22. Что представляет собой поляризованный свет? Чем он отличается от естественного?
23. Какие типы поляризации существуют?
24. Какие свойства оптических кристаллов приводят к двойному лучепреломлению?
25. От чего зависит показатель преломления среды?
26. Что такое дисперсия?
27. Какие оптические приборы могут разложить свет в спектр?

28. Какие типы спектров существуют?
29. В чем сущность эффекта Доплера–Физо?

РАЗДЕЛ 6. **КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА**

1. Что представляет собой тепловое излучение?
2. Сформулируйте закон Кирхгофа.
3. Как связаны излучательная способность и коэффициент поглощения любого тела?
4. Дайте определение абсолютно черного тела.
5. Запишите законы Стефана–Больцмана, Вина.
6. Что связывает закон смещения Вина–Голицына?
7. Запишите формулу Планка для средней энергии кванта электромагнитного излучения.
8. Каков физический смысл постоянной Планка?
9. Опишите явление внешнего фотоэффекта.
10. Какой физический смысл уравнения Эйнштейна для фотоэффекта?
11. Что такое красная, или длинноволновая, граница фотоэффекта?
12. Что определяет задерживающая разность потенциалов?
13. В чем суть внутреннего фотоэффекта? В каких веществах он может происходить?
14. Сформулируйте гипотезу Планка–Эйнштейна о квантах энергии.
15. Как связаны энергия и импульс фотона с волновыми характеристиками света?
16. В каких явлениях проявляются корпускулярные свойства света?
17. Какие законы фотоэффекта и эффекта Комптона объясняются квантовым характером излучения?
18. В чем суть идеи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме?
19. Как проявляются волновые свойства микрочастиц?
20. Запишите соотношения де Бройля для микрочастиц.
21. Что выражает соотношение неопределенностей Гайзенберга?
22. В чем суть планетарной модели атома Резерфорда?
23. Сформулируйте квантовые постулаты Бора.
24. Какие явления объясняет модель атома Бора?

25. Что описывает формула Бальмера?
26. На каких физических принципах работает квантовый генератор?

РАЗДЕЛ 7. **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

1. Что представляет собой термодинамическая система?
2. Какие параметры характеризуют молекулу в термодинамической системе?
3. Что такое молярная масса?
4. Чем определяются свойства газов, жидкостей и твердых тел?
5. Какой физический смысл числа Авогадро?
6. Что такое средняя квадратичная скорость молекулы?
7. Чем определяется температура среды? Каков ее физический смысл?
8. Что такое абсолютная температура?
9. Что представляет собой идеальный газ?
10. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
11. Чем определяется термодинамическое состояние идеального газа?
12. С помощью каких термодинамических процессов можно перейти из одного состояния идеального газа к другому?
13. Какие процессы описывают законы Гей–Люссака, Бойля–Мариотта и Шарля?
14. Что представляет собой адиабатический процесс?
15. Запишите уравнение Клапейрона–Менделеева. Каков его физический смысл?
16. Какому закону подчиняются смеси газов?
17. Дайте определение внутренней энергии термодинамической системы.
18. Какие способы изменения внутренней энергии существуют?
19. Дайте определение количества теплоты.
20. Чем определяется работа идеального газа?
21. Сформулируйте первое начало термодинамики. Какой физический закон оно выражает?
22. Что такое теплоемкость тела и удельная теплоемкость?
23. Принцип действия тепловых двигателей.
24. Определите коэффициент полезного действия тепловой ма-

шины. От чего он зависит?
25. Дайте определение обратимых и необратимых термодинамических процессов.
26. Сформулируйте второе начало термодинамики.
27. Чем определяется агрегатное состояние вещества?
28. Чем отличается агрегатное состояние от фазового состояния?
29. Какого рода фазовые переходы существуют и чем они отличаются?
30. Что такое удельная теплота парообразования (конденсации)?
31. Что такое удельная теплота плавления (кристаллизации)?
32. Что такое удельная теплота сублимации (сгорания)?
33. Сформулируйте уравнение теплового баланса. Какой физический закон оно выражает?
34. Равновесие жидкой и газообразной фаз. Ненасыщенный и насыщенный пар.
35. Как определяется влажность воздуха?
36. Что такое поверхностное натяжение жидкости?
37. Чем определяется смачивание или несмачивание жидкостей?
38. От чего зависят упругие и пластические свойства твердых тел?
39. Как зависят размеры твердых тел, жидкостей и газов от температуры?
40. Какие дефекты кристаллических решеток вы знаете?

РАЗДЕЛ 8. **ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

1. Какие элементарные частицы входят в состав атомного ядра?
2. Чем объясняется дефект масс ядра?
3. Как связаны дефект масс и энергия связи ядра?
4. Чем отличаются изотопы одного и того же элемента Периодической системы элементов Д. И. Менделеева?
5. Какие существуют типы радиоактивности?
6. Что характеризует период полураспада ядра?
7. Что представляет собой ядерная реакция? Как она символически записывается?
8. Сформулируйте законы сохранения заряда и числа нуклонов в ядерных реакциях.
9. Какие типы ядерных реакций существуют?
10. Как определить энергетический выход ядерной реакции?

11. Какие существуют методы регистрации ионизирующих излучений и элементарных частиц?
12. Как определяются доза облучения и мощность дозы облучения?
13. Какие типы элементарных частиц существуют?
14. Чем характеризуются бозоны и фермионы? Что такое спин элементарной частицы?
15. Чем античастицы отличаются от частиц? Назовите частицы, которые в то же время являются античастицами.
16. Что происходит при взаимодействии частиц и античастиц?
17. Какими квантовыми числами характеризуются элементарные частицы?
18. Что представляют собой кварки и глюоны?

3. Основные формулы и примеры решения задач

РАЗДЕЛ 5. **ОПТИКА**

Основные формулы

Световой поток Ф определяется как количество световой энергии ΔW, переносимое через некоторую площадку в единицу времени Δt,

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} \qquad (5.1)$$

и измеряется в *люменах* (*лм*): 1лм = 1Дж/с.

Сила света I, или *сила излучения* точечного источника света:

$$I = \frac{\Phi_{\text{полн}}}{4p}, \qquad (5.2)$$

где $\Phi_{\text{полн}}$ – полный световой поток, *излучаемый* источником.

Единицей измерения силы света является *свеча* (*св*), или *кандела* (*кд*): 1кд = 1лм/ср.

Сила света I, или *сила излучения* малого участка ΔS поверхности протяженного источника света в направлении, составляющем угол j с нормалью к поверхности,

$$I = \frac{\Delta\Phi_j}{\Delta\Omega} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}\cos j\,, \qquad (5.3)$$

где $\Delta\Phi_j$ – световой поток в точке М, *излучаемый* участком поверхности ΔS внутри телесного угла $\Delta\Omega$, определяемого по формуле

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{R^2}\cos j\,, \qquad (5.4)$$

где R – расстояние от точки наблюдения М до поверхности источника;

$\Delta\Phi$ – световой поток, *излучаемый* участком поверхности ΔS перпендикулярно этой поверхности (рис. 5.1).

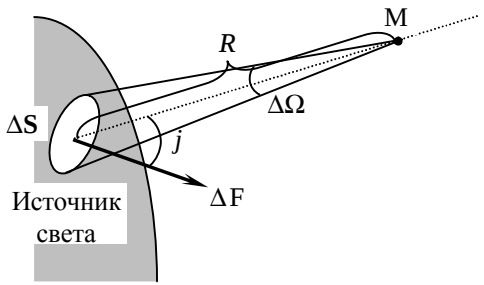

Рис. 5.1. Световой поток ΔF от элемента поверхности Δ**S** источника света

Освещенность поверхности ΔS равна

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t}, \qquad (5.5)$$

где $\Delta\Phi$ – световой поток, *падающий* на участок поверхности ΔS (рис. 5.2).

Если световой поток $\Delta\Phi$ от источника света силой I падает на поверхность ΔS под углом a, то освещенность этого участка поверхности равна

$$E = \frac{I\cos a}{R^2}. \qquad (5.6)$$

Освещенность измеряется в *люксах* (*лк*): $1\text{лк} = 1\text{кд/м}^2$.

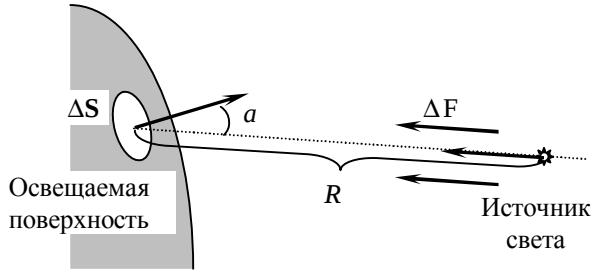

Рис. 5.2. Освещенность элемента поверхности Δ**S** потоком ΔF от источника света

Абсолютный показатель преломления среды равен

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{l\,n} = \frac{2p\,c}{l\,w}, \qquad (5.7)$$

где c – скорость распространения света в вакууме (табл. А.2);

v – скорость распространения света в среде;

l, n – длина волны и частота света;

w – циклическая частота.

Относительный показатель преломления n_{21} второй среды относительно первой равен

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \qquad (5.8)$$

где n_1, n_2 – абсолютные показатели преломления сред;

v_1, v_2 – скорости распространения света в первой и второй средах.

При переходе света из одной среды в другую частота света не меняется.

Законы геометрической оптики (рис. 5.3):

1. Закон отражения. ***Луч света, падающий на границу раздела двух сред с различными показателями преломления, отраженный от границы луч света и перпендикуляр к поверхности раздела, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости, причем угол отражения равен углу падения,*** $j' = j$ **.**

2. Закон преломления. ***Луч света, падающий на границу раздела двух сред с различными показателями преломления,***

преломленный на границе луч света и перпендикуляр к поверхности раздела, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости, причем углы падения и преломления связаны соотношением

$$\frac{\sin j}{\sin y} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \qquad (5.9)$$

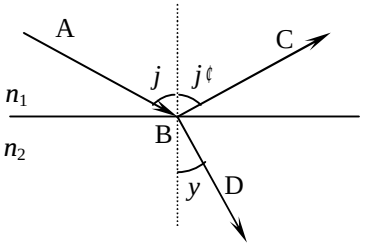

Рис. 5.3. Отражение и преломление света на границе двух сред

Оптическая длина пути луча света равна

$$L = nl, \qquad (5.10)$$

где l – геометрическая длина пути светового луча в среде с показателем преломления n.

При построении хода лучей света, отражающихся от сферической границы двух сред (рис. 5.4–5.6) или преломляющихся на ней (рис. 5.7), следует выбрать направление положительного отсчета. Оно отсчитывается от точки пересечения сферической границы с оптической осью, и положительное направление совпадает с направлением луча от источника света.

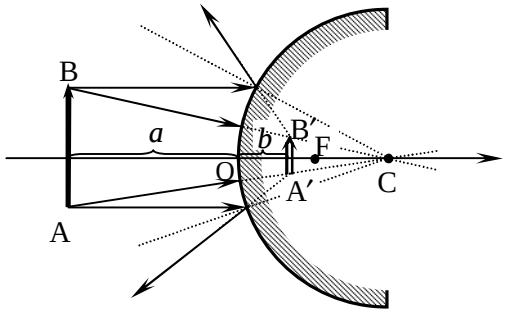

Рис. 5.4. Построение мнимого изображения в выпуклом сферическом зеркале

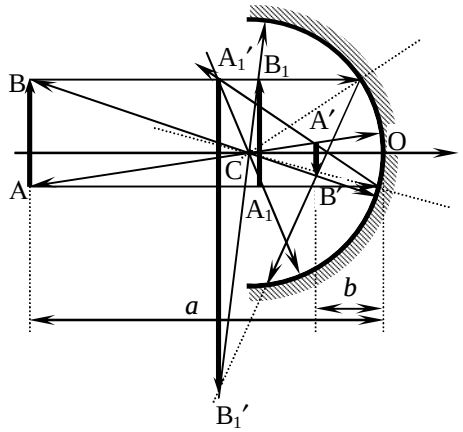

Рис. 5.5. Построение действительного уменьшенного A′B′ $(a > R = 2F)$ и увеличенного $A_1'B_1'$ $(F < a < R)$ изображений в вогнутом сферическом зеркале

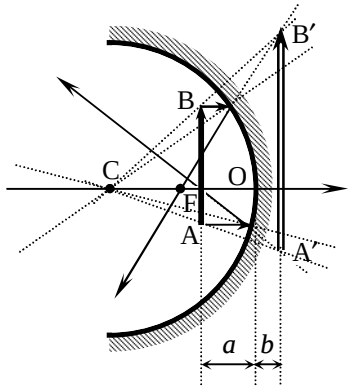

Рис. 5.6. Построение мнимого изображения в вогнутом сферическом зеркале

Примеры построения различных изображений в выпуклых и вогнутых сферических зеркалах приведены на рис. 5.4–5.6.

Для выпуклого зеркала $a < 0$, $b > 0$, $R > 0$, $F > 0$, изображение в нем всегда является мнимым (рис. 5.4). В случае вогнутого зеркала $a < 0$, $R < 0$, $F < 0$, изображение может быть действительным ($b < 0$, $a \geq F$, рис. 5.5) или мнимым ($b > 0$, $|a| < F$, рис. 5.6).

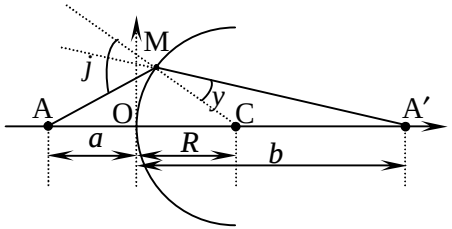

Рис. 5.7. Прохождение луча света от источника А через сферическую границу раздела сред с разными показателями преломления

Формула сферического зеркала:

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{2}{R}=\frac{1}{F}, \qquad (5.11)$$

где a – расстояние от изображаемой точки А (или предмета АВ источника), расположенной на главной оптической оси, до полюса О сферической поверхности;

b – расстояние от полюса О сферической поверхности до изображения А′ точки А (или А′В′ предмета АВ);

R – радиус сферической поверхности;

F – фокусное расстояние зеркала.

Изображение в зеркале является *действительным*, если источник и изображение находятся по одну сторону от поверхности зеркала, и *мнимым*, если источник и изображение находятся по разные стороны от поверхности зеркала.

Линейное увеличение зеркала или линзы равно

$$U=\pm\frac{L'}{L}, \qquad (5.12)$$

где $L=\text{AB}$ – поперечный линейный размер предмета;

$L'=\text{A}'\text{B}'$ – поперечный линейный размер изображения, причем знак «+» соответствует прямому изображению, знак «–» – обратному изображению.

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{b}-\frac{1}{a}=(n_{21}-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)=\frac{1}{F}=D, \qquad (5.13)$$

где b – расстояние от центра О линзы до изображения А′ (или А′В′) точки А (или предмета АВ);

a – расстояние от изображаемой точки (А) (или предмета АВ) (источника), расположенной на главной оптической оси, до центра О линзы;

r_1 – радиус сферической поверхности линзы, обращенной к источнику;

r_2 – радиус сферической поверхности линзы, обращенной к изображению;

F – фокусное расстояние линзы;

D – оптическая сила линзы, измеряемая в диоптриях, $1\,\text{дптр}=1\,\text{м}^{-1}$.

Изображение в линзе является *действительным*, если источник и изображение находятся по разные стороны линзы, и *мнимым*, если по одну сторону линзы.

Прохождение луча света через сферическую границу раздела двух сред показано на рис. 5.7.

Примеры построения различных изображений в двояковыпуклых и двояковогнутых линзах приведены на рис. 5.8 и 5.9. Для двояковыпуклой линзы $a<0$, $F>0$ и изображение будет действительным $(b>0)$, если $|a|\geq F$, и мнимым $(b=b_1<0)$, если $|a|\leq F$ (рис. 5.8). Для двояковогнутой линзы $a<0$, $F<0$ и изображение всегда является мнимым $(b<0,\ b_1<0)$ (рис. 5.9).

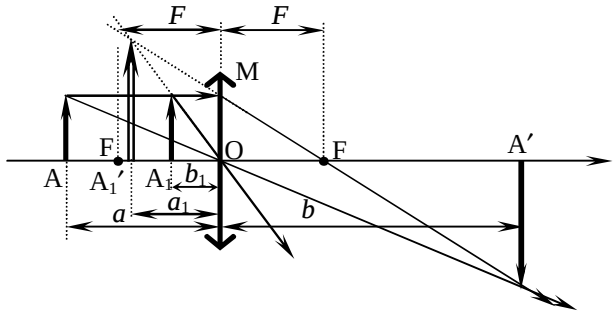

Рис. 5.8. Построение действительного (А′) и мнимого (A_1') изображений в двояковыпуклой линзе

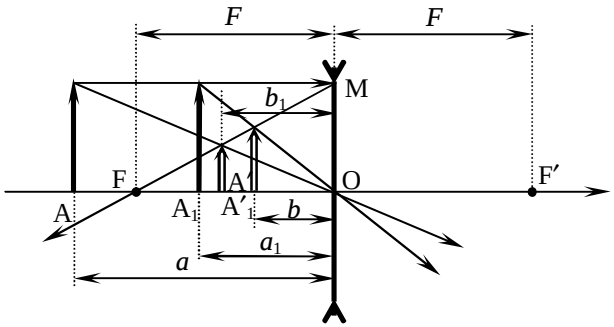

Рис. 5.9. Построение мнимого изображения в двояковогнутой линзе

Микроскоп представляет собой систему из объектива с коротким фокусным расстоянием F_1 и окуляра с длинным фокусным расстоянием F_2 (рис. 5.10). Предмет АВ помещается перед передним фокусом объектива. Его действительное изображение А′В′, находящееся между передним фокусом окуляра и окуляром, рассматривается через окуляр, который дает сильно увеличенное мнимое изображение A_1B_1 предмета.

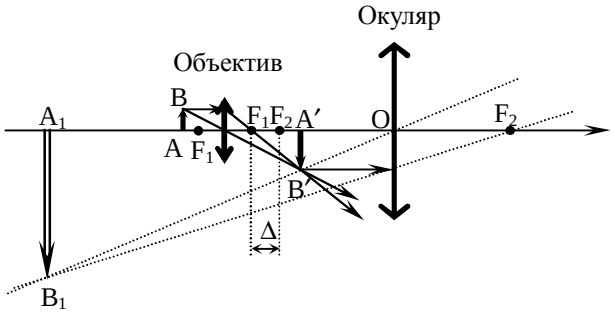

Рис. 5.10. Ход лучей в микроскопе

Увеличение объектива равно

$$\Gamma_1 = \frac{\Delta}{F_1}, \qquad (5.14)$$

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

Увеличение окуляра равно

$$\Gamma_2 = \frac{D_0}{F_2}, \qquad (5.15)$$

где $D_0 = A_1O$ – расстояние наилучшего зрения, или расстояние между окуляром и мнимым изображением A_1B_1 предмета, когда действительное изображение А′В′ находится в фокальной плоскости окуляра (для нормального глаза $D_0 = 25$ см).

Увеличение микроскопа равно

$$\Gamma = \Gamma_1\Gamma_2 = \frac{\Delta D_0}{F_1F_2}. \qquad (5.16)$$

Простейшим телескопом является телескоп-рефрактор, представляющий собой систему из объектива с длинным фокусным расстоянием F_1 и окуляра с коротким фокусным расстоянием F_2, причем для нормального глаза задняя фокальная плоскость F_1 объектива практически совпадает с передней фокальной плоскостью F_2 окуляра (рис. 5.11).

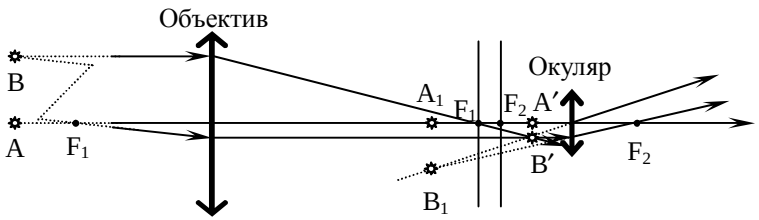

Рис. 5.11. Ход лучей в телескопе-рефракторе

Оптическая разность хода световых лучей, распространяющихся в средах с показателями преломления n_1 и n_2, равна

$$\Delta = n_2 l_2 - n_1 l_1. \qquad (5.17)$$

Условие усиления когерентных волн света в интерференционной картине:

$$\Delta = n_2 l_2 - n_1 l_1 = m\,l\,,\ \ m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \qquad (5.18)$$

где λ – длина волны света.

Условие ослабления волн:

$$\Delta = n_2 l_2 - n_1 l_1 = \frac{2m+1}{2}\,l\,,\ \ m = 0, \pm 1, \pm 2, ... \qquad (5.19)$$

Принцип Гюйгенса–Френеля: ***Каждая точка волнового фронта в некоторый момент времени t является источником вторичных когерентных сферических волн, способных интерферировать друг с другом, огибающая которых в момент времени t + Dt образует волновой фронт.***

Условие наблюдения главных максимумов интенсивности света при дифракции света, падающего нормально на дифракционную решетку:

$$d \sin j = m\,l\,,\ \ m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2, ..., \qquad (5.20)$$

где d – период, или постоянная дифракционной решетки;

j – угол дифракции;

m – порядок главного максимума.

Закон Малюса для идеального поляризатора:

$$I = I_0 \cos^2 j\,, \qquad (5.21)$$

где I_0 – интенсивность линейно поляризованного света, падающего на поляризатор;

I – интенсивность света, прошедшего через поляризатор;

j – угол между плоскостью поляризации (направлением электрического вектора) падающего света и плоскостью пропускания (оптической осью) поляризатора.

Интенсивность естественного света, прошедшего через идеальный поляризатор, равна

$$I = \frac{I_0}{2}, \qquad (5.22)$$

где I_0 – интенсивность естественного света, падающего на поляризатор.

Частично поляризованный свет определяется как смесь естественного света интенсивности $I_{\text{ест}}$ и поляризованного света интенсивности $I_{\text{пол}}$. Его интенсивность I_0 равна $I_0 = I_{\text{ест}} + I_{\text{пол}}$.

Степень поляризации равна

$$P = \frac{I_{\text{пол}}}{I_0} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \qquad (5.23)$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – максимальное и минимальное значения интенсивности света, прошедшего через поляризатор, которые можно измерить с помощью анализатора.

Закон Брюстера:

$$\text{tg}\, j_{\text{B}} = n, \qquad (5.24)$$

где j_{B} – угол Брюстера – угол падения, при котором отразившийся от диэлектрика луч полностью поляризован;

n – относительный показатель преломления преломляющей среды.

Примеры решения задач

Задача 1. Фотографический снимок печатали «контактным способом». При этом лампа располагалась на расстоянии $r_1 = 60\,\text{см}$ от снимка, а экспозиция длилась $t_1 = 16\,\text{с}$. Каково должно быть время экспозиции t_2, если заменить лампу на другую с силой света, втрое меньшей, и поместить ее на расстоянии $r_2 = 45\,\text{см}$ от снимка?

Решение. Для получения изображения такого же качества на всю поверхность S фотобумаги должно попасть такое же количество световой энергии $W_2 = W_1$. Если E_1 и E_2 – освещенности листа бумаги, а I_1 и I_2 – силы света источников, то световая энергия в обоих случаях будет равна

$$W_1 = E_1 t_1 = \frac{I_1}{r_1^2} t_1,$$

$$W_2 = E_2 t_2 = \frac{I_2}{r_2^2} t_2.$$

Так как $I_1 = 3I_2$, то приравнивая W_1 и W_2, получаем:

$$\frac{I_2}{r_2^2} t_2 = \frac{I_1}{r_1^2} t_1,$$

откуда $t_2 = \frac{I_1 r_2^2}{I_2 r_1^2} t_1 = \frac{3r_2^2}{r_1^2} t_1 = \frac{3 \cdot 45^2}{60^2} \cdot 16\,\text{с} = 27\,\text{с}.$

Ответ: $t_2 = \frac{3r_2^2}{r_1^2} t_1 = 27\,\text{с}.$

Задача 2. Над площадью висит фонарь, создающий освещенность $E_1 = 10\,\text{лк}$ в тех точках, в которых лучи падают на землю под углом a_1 $(\cos a_1 = 0,3)$. Какова освещенность E_2 в точках, в которых лучи падают на землю под углом a_2 $(\cos a_2 = 0,6)$?

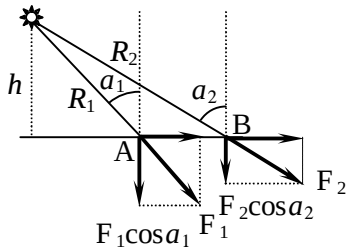

Рис. 5.12

Решение. Освещенности малой площадки ΔS в окрестности точек А и В (рис. 5.12) создает поток света, падающий на эту поверхность вертикально, т. е. $\Phi_1 \cos a_1$ в точке А и $\Phi_2 \cos a_2$ в точке В. Эти освещенности равны

$$E_1 = \frac{\Phi_1 \cos a_1}{\Delta S}, \quad E_2 = \frac{\Phi_2 \cos a_2}{\Delta S}. \quad (1)$$

Если силу света фонаря обозначить через *I*, а высоту, на которой он висит, через *h*, то световые потоки Φ_1 в точке А и Φ_2 в точке В, падающие на одну и ту же площадку Σ перпендикулярно к ней, равны

$$\Phi_1 = I\Delta\Omega_1 = \frac{I\Sigma}{R_1^2} = \frac{I\Sigma\cos^2 a_1}{h^2}, \quad \Phi_2 = I\Delta\Omega_2 = \frac{I\Sigma}{R_2^2} = \frac{I\Sigma\cos^2 a_2}{h^2}, \quad (2)$$

где $\Delta\Omega_1$ и $\Delta\Omega_2$ – телесные углы, под которыми площадка Σ видна из источника света.

Из выражений (1) и (2) следует, что освещенности относятся как

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi_2 \cos a_2}{\Phi_1 \cos a_1} = \frac{R_1^2 \cos a_2}{R_2^2 \cos a_1} = \frac{\cos^3 a_2}{\cos^3 a_1}, \quad (3)$$

откуда сразу получаем:

$$E_2 = E_1 \frac{\cos^3 a_2}{\cos^3 a_1} = 10 \cdot \frac{(0,6)^3}{(0,3)^3}\,\text{лк} = 80\,\text{лк}.$$

Ответ: $E_2 = E_1 \frac{\cos^3 a_2}{\cos^3 a_1} = 80\,\text{лк}.$

Задача 3. Яркая лампа висит над центром комнаты на высоте $h = 1,5\,\text{м}$ от потолка. Высота комнаты $H = 4\,\text{м}$. На полу лежит плоское зеркальце диаметра $d = 5\,\text{см}$. Какого диаметра «зайчик» будет от него на потолке, если зеркальце расположено на расстояниях $l_1 = 0,5\,\text{м}$ и $l_2 = 1,5\,\text{м}$ от центра комнаты?

Решение. Для решения задачи рассмотрим рис. 5.13. Центр зеркальца З находится на расстоянии

$$l = \sqrt{l_1^2 + l_2^2} = \sqrt{0,5^2 + 1,5^2}\,\text{м} = \sqrt{2,5}\,\text{м}$$

от центра О комнаты и проецируется в точку О′ на потолке. Края зеркальца $З_1$ и $З_2$ находятся на расстояниях $l - d/2$ и $l + d/2$ от центра комнаты и проецируются в точки $О'_1$ и $О'_2$, соответственно. Луч света, отразившийся от ближнего края зеркальца $З_1$, попадет в точку $З'_1$ на потолке, находящуюся на расстоянии, определяемом из подобия треугольников $ЛОЗ_1$ и $З_1О'_1З'_1$. Аналогично, луч света, отразившийся от дальнего края зеркальца $З_2$, попадет в точку $З'_2$ на потолке, находящуюся на расстоянии, определяемом из подобия треугольников $ЛОЗ_2$ и $З_1О'_2З'_1$. Следовательно, имеем следующие соотношения:

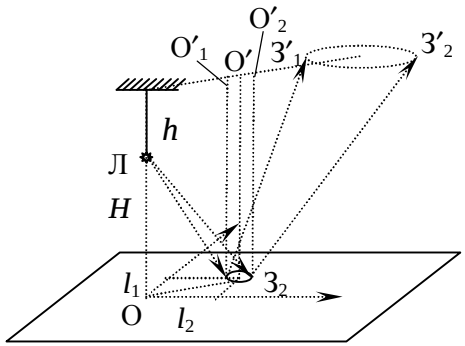

Рис. 5.13

$$\frac{H-h}{l-d/2} = \frac{H}{O'_1З'_1}; \quad \frac{H-h}{l+d/2} = \frac{H}{O'_2З'_2}.$$

Отсюда находим

$$O'_1З'_1 = \frac{H}{H-h}\left(l - \frac{d}{2}\right); \quad O'_2З'_2 = \frac{H}{H-h}\left(l + \frac{d}{2}\right).$$

Расстояние $D = O_1'З_2' - O_1'З_1'$ представляет собой диаметр пятна отраженного света на потолке:

$$D = O_1'З_2' - O_1'З_1' = O_1'O_2' + O_2'З_2' - O_1'З_1' =$$

$$= d + \frac{Hd}{H-h} = 0,05 + \frac{4 \cdot 0,05}{4-1,5} = 0,13 \text{ м},$$

что показывает, что диаметр пятна не зависит от того, где находится зеркальце.

Ответ: $D = d\left(1 + \frac{H}{H-h}\right) = 0,13$ м.

Задача 4. В воздухе длина волны монохроматического света $l_1 = 0,60$ мкм, а длина волны этого же света в стекле – $l_2 = 0,42$ мкм. Под каким углом падает свет на плоскую границу раздела воздух-стекло, если отраженный и преломленный лучи образуют прямой угол?

Решение. Для решения задачи рассмотрим рис. 5.3 (с. 16 данного пособия). Согласно закону отражения света $j' = j$. По условию задачи $\angle CBD = p - j' - y = p/2$, откуда следует $j' + y = p/2$. Из закона преломления получаем:

$$\frac{\sin j}{\sin y} = \frac{\sin j}{\sin\left(\frac{p}{2} - j\right)} = \text{tg}\, j = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{l_1 n}{l_2 n} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Отсюда получаем:

$$j = \text{arctg}\frac{l_1}{l_2} = \text{arctg}\frac{0,60}{0,42} = \text{arctg}1,43 = 55°.$$

Ответ: $j = \text{arctg}\frac{l_1}{l_2} = 55°$.

Задача 5. В цистерне с сероуглеродом на глубине $h = 26$ см под поверхностью расположен точечный источник света. Найти площадь круга на поверхности жидкости, в пределах которого возможен выход лучей в воздух. Показатель преломления сероуглерода $n = 1,64$.

Решение. Для решения задачи рассмотрим рис. 5.14. Очевидно, радиус R круга, в пределах которого возможен выход лучей в воздух, будет определяться максимальным углом падения y, при котором происходит полное внутреннее отражение. Угол преломления луча света, переходящего из сероуглерода в воздух, в этом случае равен 90°. Поэтому угол y определится из условия полного внутреннего отражения:

$$\frac{\sin 90°}{\sin y} = \frac{1}{\sin y} = n.$$

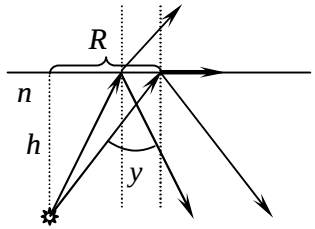

Рис. 5.14

Из рис. 5.14 видно, что

$$R = h\,\text{tg}\,y = \frac{h \sin y}{\sqrt{1 - \sin^2 y}} = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

Таким образом, искомая площадь круга равна

$$S = p R^2 = \frac{p h^2}{n^2 - 1} = \frac{3,14 \cdot 26^2}{1,64^2 - 1} \text{ см}^2 = 1256 \text{ см}^2.$$

Ответ: $S = \frac{p h^2}{n^2 - 1} = 1256$ см^2.

Задача 6. Стержень опущен концом в прозрачную жидкость с показателем преломления n и образует с поверхностью жидкости угол a. Наблюдателю, который смотрит сверху, конец стержня, погруженный в жидкость, кажется смещенным на угол b (рис. 5.15). При каком угле a наклона стержня угол смещения b будет максимальным?

Решение. Обозначим через l ту часть стержня, которая погружена в воду. Тогда конец стержня будет находиться на глубине

$$H = l \sin a. \qquad (1)$$

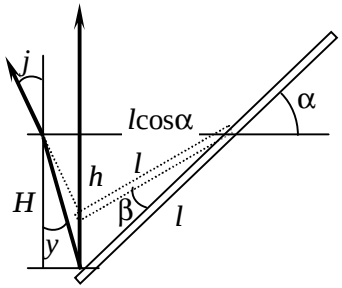

Рис. 5.15

Наблюдателю, смотрящему под углом j на погруженный конец стержня, будет казаться, что длина его равна $l' = \frac{l \cos a}{\cos(a - b)}$, а конец находится на глубине

$$h = l' \sin(a - b) = l \cos a\ \text{tg}(a - b). \qquad (2)$$

С другой стороны, из рис. 5.15 видно, что $H\sin y = h\sin j$, где y – угол преломления, откуда в силу закона преломления следует:

$$H = h\frac{\sin j}{\sin y} = h\,n. \qquad (3)$$

Следовательно, комбинируя выражения (1)–(3), получаем:

$$\mathrm{tg}a = n\mathrm{tg}(a-b) = n\frac{\mathrm{tg}a - \mathrm{tg}b}{1+\mathrm{tg}a\,\mathrm{tg}b}, \qquad (4)$$

откуда находим

$$\mathrm{tg}b = \frac{n-1}{\mathrm{tg}a + n\,\mathrm{ctg}a}. \qquad (5)$$

Очевидно, угол b будет максимальным в том случае, когда знаменатель в правой части выражения (5) будет минимальным, т. е. производная знаменателя по a (или по $x = \mathrm{tg}a$) должна обращаться в нуль:

$$(\mathrm{tg}a + n\mathrm{ctg}a)' = \left(x + \frac{n}{x}\right)' = 1 - \frac{n}{x^2} = 1 - \frac{n}{\mathrm{tg}^2 a} = 0.$$

Отсюда получаем окончательный ответ: $a = \mathrm{arctg}\sqrt{n}$.

Ответ: $a = \mathrm{arctg}\sqrt{n}$.

Задача 7. Предмет высотой $h = 0,06$ м находится на расстоянии $a = 0,14$ м от вогнутого зеркала с фокусным расстоянием $F = 0,11$ м. Найти высоту H изображения.

Решение. Так как $F < a < 2F$, то условиям задачи соответствует предмет A_1B_1 и его изображение $A_1'B_1'$ (см. рис. 5.5), из которого видно, что имеет место пропорция:

$$\frac{A_1'B_1'}{A_1B_1} = \frac{H}{h} = \frac{b-R}{R-a} = \frac{b-2F}{2F-a}. \qquad (1)$$

Применяя формулу сферического зеркала, находим b:

$$b = \frac{Fa}{a-F}. \qquad (2)$$

Наконец, из выражений (1) и (2) находим высоту изображения, равную

$$H = \frac{\frac{Fa}{a-F} - 2F}{2F-a}h = \frac{hF}{a-F} = \frac{0,06\cdot 0,11}{0,14-0,11}\text{ м} = 0,22\text{ м}.$$

Ответ: $H = \dfrac{hF}{a-F} = 0,22$ м.

Задача 8. Действительное изображение светящейся точки получается на расстоянии $b = 8$ см от линзы и на расстоянии $L = 2$ см ниже ее главной оптической оси. Фокусное расстояние линзы $F = 5$ см, ее радиус $r = 5$ см. На каком расстоянии d перед линзой нужно поставить экран, имеющий форму верхней половины линзы, чтобы изображение точки исчезло?

Решение. Если экран закроет все лучи от светящейся точки, которые должны попасть на линзу, чтобы дать изображение, то изображение исчезнет. Из рис. 5.16 видно, что должны выполняться пропорции

$$\frac{l}{a-d} = \frac{r}{d}, \quad \frac{l}{a} = \frac{L}{b}, \qquad (1)$$

откуда следует

$$\frac{a-d}{a} = 1 - \frac{d}{a} = \frac{dL}{br}. \qquad (2)$$

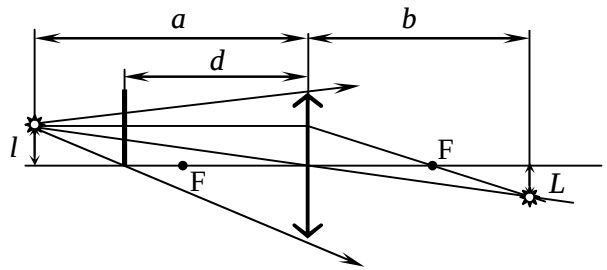

Рис. 5.16

С помощью формулы тонкой линзы $\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = \frac{1}{F}$ можно избавиться от неизвестной величины a, в результате чего из выражения (2) получаем:

$$d\left(\frac{1}{F}-\frac{1}{b}+\frac{L}{br}\right)=1,$$

откуда

$$d=\frac{rbF}{br-rF+LF}=\frac{5\cdot 8\cdot 5}{8\cdot 5-5\cdot 5+2\cdot 5}\text{ см}=8\text{ см}.$$

Ответ: $d=\dfrac{rbF}{br-rF+LF}=8\text{ см}.$

Задача 9. Мнимое изображение светящейся точки в рассеивающей линзе с оптической силой $D=-5$ дптр находится в два раза ближе к линзе, чем сама точка. Найти положение светящейся точки, если она лежит на главной оптической оси линзы.

Решение. Формула тонкой рассеивающей линзы (рис. 5.9) имеет вид

$$\frac{1}{a}-\frac{1}{b}=-\frac{1}{F}=D.$$

По условию задачи $a=2b$. Поэтому $a=F=-\dfrac{1}{D}=\dfrac{1}{5}\text{ м}=0,2\text{ м}.$

Ответ: $a=-\dfrac{1}{D}=0,2\text{ м}.$

Задача 10. Предмет находится на расстоянии $a=18\text{ см}$ от плоско-выпуклой линзы с фокусным расстоянием $F=12\text{ см}$. Выпуклая поверхность линзы обращена к предмету, плоская поверхность линзы посеребрена. На каком расстоянии d от линзы находится изображение предмета?

Решение. Если бы плоская поверхность не была посеребрена, мы получили бы изображение предмета на расстоянии b, определяемом с помощью формулы тонкой собирающей линзы $(a<0,\ b>0,\ F>0)$:

$$\frac{1}{b}-\frac{1}{a}=\frac{1}{F}. \qquad (1)$$

После прохождения тела линзы свет отражается от плоской зеркальной поверхности и снова проходит по телу линзы, которая будет давать изображение, находящееся на расстоянии d от линзы, определяемом также с помощью формулы тонкой линзы $(d<0,\ b>0,\ F>0)$:

$$\frac{1}{d}-\frac{1}{b}=\frac{1}{F}. \qquad (2)$$

Складывая выражения (1) и (2), получаем:

$$\frac{1}{d}-\frac{1}{a}=\frac{2}{F},$$

откуда

$$d=\frac{Fa}{F+2a}=\frac{12\cdot(-18)}{12+2\cdot(-18)}\text{ см}=9\text{ см}>0,$$

т. е. изображение и предмет находятся по разные стороны от линзы.

Ответ: $d=\dfrac{Fa}{F+2a}=9\text{ см}.$

Задача 11. Параллельный пучок света падает на собирающую линзу, а затем на вогнутое зеркало с фокусным расстоянием $F_2=24\text{ см}$. Расстояние между линзой и зеркалом $d=32\text{ см}$. Каким должно быть фокусное расстояние F_1 линзы, чтобы свет, отразившись от зеркала, собрался в точке, удаленной от зеркала на расстояние $b=6\text{ см}$?

Решение. Так как лучи света собираются перед зеркалом, то фокус линзы, в котором собирались бы лучи, если бы зеркала не было, должен находиться за зеркалом на расстоянии a от него. Из рис. 5.17 видно, что $F_1=d+a$. Используя формулу зеркала

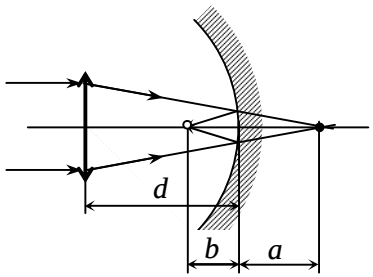

Рис. 5.17

$$\frac{1}{b}-\frac{1}{a}=\frac{1}{F_2}=\frac{1}{b}-\frac{1}{F_1-d},$$

найдем

$$F_1=d+\frac{bF_2}{F_2-b}=32+\frac{6\cdot 24}{24-6}\text{ см}=40\text{ см}.$$

Ответ: $F_1=d+\dfrac{bF_2}{F_2-b}=40\text{ см}.$

Задача 12. Собирающая и рассеивающая линзы с фокусными расстояниями $F_1 = 10\,\text{см}$ и $F_2 = 20\,\text{см}$ находятся на расстоянии $D = 15\,\text{см}$ друг от друга. На каком расстоянии L от рассеивающей линзы нужно расположить вторую собирающую линзу с фокусным расстоянием $F_3 = 10\,\text{см}$, чтобы выходящий из системы пучок лучей остался параллельным?

Решение. Используем формулу тонкой линзы для каждой из линз. Пусть a_1, a_2, a_3 – расстояния от предмета до соответствующей линзы, а b_1, b_2, b_3 – расстояния от соответствующей линзы до изображения. По условию задачи $a_1 = \infty$, $b_3 = \infty$, так как входящий и выходящий пучки параллельны оптической оси. Формула линзы имеет вид: $\frac{1}{b_1} = \frac{1}{F_1}$ – для первой линзы, $-\frac{1}{b_2} + \frac{1}{a_2} = -\frac{1}{F_2}$ – для второй линзы, $\frac{1}{a_3} = \frac{1}{F_3}$ – для третьей линзы. Расстояние a_2 от фокуса F_1, являющегося точкой, в которой сходятся лучи, прошедшие первую линзу, до второй линзы равно, очевидно, $a_2 = D - b_1 = D - F_1$. Расстояние a_3 от мнимого изображения, полученного от второй линзы и находящегося перед ней на расстоянии b_2, очевидно, равно $a_3 = b_2 + L$. Комбинируя все эти соотношения, получаем:

$$L = a_3 - b_2 = F_3 - \frac{a_2 F_2}{a_2 + F_2} = F_3 - \frac{(D - F_1)F_2}{D - F_1 + F_2} =$$

$$= 10 - \frac{(15-10)\cdot 20}{15 - 10 + 20} = 6\,\text{см}.$$

Ответ: $L = F_3 - \frac{(D - F_1)F_2}{D - F_1 + F_2} = 6\,\text{см}.$

Задача 13. Фокусное расстояние объектива микроскопа $F_1 = 0,5\,\text{см}$, расстояние между объективом и окуляром $L = 16\,\text{см}$. Увеличение микроскопа $\Gamma = 200$. Найти фокусное расстояние F_2 и увеличение Γ_2 окуляра, если расстояние наилучшего зрения $D_0 = 25\,\text{см}$.

Решение. Увеличение окуляра можно найти из соотношения:

$$\Gamma_2 = \frac{D_0}{F_2} = \frac{\Gamma}{\Gamma_1}, \qquad (1)$$

где F_2 – фокусное расстояние объектива;

Γ_1 – увеличение объектива:

$$\Gamma_1 = \frac{\Delta}{F_1}. \qquad (2)$$

Расстояние Δ между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра определяется из соотношения:

$$L = F_1 + F_2 + \Delta. \qquad (3)$$

Комбинируя выражения (1)–(3), получаем соотношение:

$$\Gamma_2 = \frac{D_0}{F_2} = \frac{\Gamma}{\Gamma_1} = \frac{\Gamma F_1}{\Delta} = \frac{\Gamma F_1}{L - F_1 - F_2},$$

из которого легко находим фокусное расстояние объектива F_2

$$F_2 = \frac{D_0(L - F_1)}{\Gamma F_1 + D_0} = \frac{25\cdot(16 - 0,5)}{200\cdot 0,5 + 25}\,\text{см} = 3,1\,\text{см}. \qquad (4)$$

Наконец, подставляя выражение (4) в (1), получаем увеличение окуляра

$$\Gamma_2 = \frac{D_0}{F_2} = \frac{\Gamma F_1 + D_0}{L - F_1} = \frac{25}{3,1} \approx 8,06.$$

Ответ: $F_2 = \frac{D_0(L - F_1)}{\Gamma F_1 + D_0} = 3,1\,\text{см}$, $\Gamma_2 = \frac{\Gamma F_1 + D_0}{L - F_1} \approx 8.$

Задача 14. На дифракционную решетку с периодом $d = 6\,\text{мкм}$ падает монохроматическая волна. Определить в нанометрах длину волны, если угол между дифракционными максимумами второго и третьего порядков равен $\Delta j = 3°$. Углы дифракции считать малыми.

Решение. Используем условие наблюдения главных максимумов интенсивности света при дифракции:

$$d \sin j = m l, \qquad (1)$$

где d – период дифракционной решетки;

j – угол между нормалью к поверхности решетки и направлением дифрагированных лучей;

$m = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ – порядковый номер дифракционного максимума;

l – длина волны.

По условию задачи углы дифракции необходимо считать малыми, следовательно, $\sin j \approx j$. Тогда условия наблюдения дифракционных максимумов второго и третьего порядков определяются по формулам

$$d j_2 = m_2 l; \; d j_3 = m_3 l. \qquad (2)$$

Угол Δj между дифракционными максимумами второго и третьего порядков равен

$$\Delta j = j_3 - j_2.$$

Из формул (2) следует, что углы j_2 и j_3 отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости дифракционной решетки равны

$$j_2 = m_2 \frac{l}{d}, \; j_3 = m_3 \frac{l}{d}.$$

Тогда

$$\Delta j = (m_3 - m_2)\frac{l}{d}.$$

Отсюда получаем длину волны падающего света

$$l = \frac{d\Delta j}{m_3 - m_2} = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 3{,}14}{(3-2) \cdot 180} \text{ м} = 314 \text{ нм}.$$

Ответ: $l = \dfrac{d\Delta j}{m_3 - m_2} = 314$ нм.

Задача 15. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает параллельный пучок лучей с длиной волны $l = 0{,}50$ мкм. Период дифракционной решетки $d = 4{,}95$ мкм. Определить, сколько максимумов дает дифракционная решетка и максимальный угол отклонения лучей, соответствующих последнему дифракционному максимуму.

Решение. Дифракционная решетка не может отклонить лучи больше, чем на 90°. Поэтому, заменив $\sin j$ на 1, так как

$\sin 90° = 1$, в формуле дифракционной решетки

$$d \sin j = m l, \; m = 0, \pm 1, \pm 2, ... \qquad (1)$$

получим значение

$$m = \frac{d}{l} = \frac{4{,}95 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-7}} = 9{,}9, \; m = 0, \pm 1, \pm 2, ... \qquad (2)$$

Число m обязательно должно быть целым, но оно не может быть равным 10, так как при этом значение $\sin j$ станет больше 1. Следовательно, в обе стороны от центрального максимума, соответствующего $m = 0$, будет наблюдаться по 9 максимумов, т. е. всего $N = 2m_{\max} = 18$ максимумов.

С учетом полученного максимального значения $m = 9$, из формулы (1) определим максимальный угол $j_{\max}$ отклонения лучей:

$$\sin j_{\max} = \frac{9l}{d} \approx 0{,}9091.$$

Тогда

$$j_{\max} = \arcsin 0{,}9091 \approx 65°.$$

Ответ: $N = 2m_{\max} = 18$, $j_{\max} \approx 65°$.

Задача 16. Интенсивность естественного света, прошедшего через два поляризатора, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определить угол между главными плоскостями поляризаторов.

Решение. Естественный свет не поляризован, т. е. все направления колебаний электрического и магнитного векторов, перпендикулярные световым лучам, равноправны. Проходя через поляризатор, естественный свет становится плоскополяризованным, при этом интенсивность его будет составлять половину интенсивности естественного света. Поэтому интенсивность света, прошедшего через первый поляризатор, равна

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

Согласно закону Малюса, интенсивность света, прошедшего через второй анализатор, равна

$$I_2 = I_1 \cos^2 a = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 a. \qquad (2)$$

По условию задачи интенсивность естественного света, прошедшего через два поляризатора, уменьшилась в 8 раз, следовательно, из формулы (2) вытекает соотношение:

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{1}{2}\cos^2 a = \frac{1}{8},$$

откуда найдем угол между главными плоскостями поляризаторов:

$$\cos a = \frac{1}{2},\ a = 60°.$$

Ответ: $a = 60°$.

РАЗДЕЛ 6. **КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА**

Основные формулы

Полный поток лучистой энергии источника излучения:

$$P = \frac{dW}{dt}, \qquad (6.1)$$

где dW – энергия, излучаемая источником за время dt.

Энергетическая светимость источника излучения:

$$R = \frac{dW}{dt d\Sigma} = \frac{dP}{d\Sigma} = \int_0^\infty dR_l = \int_0^\infty r(l,T)\,dl, \qquad (6.2)$$

где $d\Sigma$ – элемент площади поверхности тела;

dR_l – суммарная светимость, приходящаяся на интервал длин волн dl;

$r(l,T) = dR_l / dl$ – испускательная способность, или спектральная плотность энергетической светимости тела;

T – температура тела.

Энергетическая освещенность поверхности:

$$E_э = \frac{dW}{dt d\Sigma'} = \frac{dP}{d\Sigma'}, \qquad (6.3)$$

где dW – энергия, падающая на площадку $d\Sigma'$ поверхности за время dt;

dP – суммарный поток энергии, падающий на площадку $d\Sigma'$.

Коэффициент поглощения:

$$a = \frac{P_a}{P_f} = \int_0^\infty a(l,T)\,dl, \qquad (6.4)$$

где $P_a = \int_0^\infty p_a(l,T)\,dl$ – часть полного потока энергии, поглощенной телом;

$p_a(l,T)\,dl$ – часть потока энергии, поглощенной телом, приходящейся на интервал длин волн dl;

$P_f = \int_0^\infty p_f(l,T)\,dl$ – полный поток лучистой энергии, падающей на тело;

$p_f(l,T)\,dl$ – часть полного потока энергии, падающей на тело, приходящейся на интервал длин волн dl;

$a(l,\ T)$ – спектральный коэффициент поглощения, или поглощательная способность тела.

Принцип детального равновесия. ***Испускательная способность тела равна спектральной плотности мощности равновесного излучения, поглощаемого этим телом,***

$$r(l,T) = p_a(l,T). \qquad (6.5)$$

Закон Кирхгофа (дифференциальный). ***Отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел и является функцией только частоты и температуры***

$$\frac{r(l,T)}{a(l,T)} = r_0(l,T), \qquad (6.6)$$

где $r_0(l,T)$ – спектральная плотность мощности излучения, или излучательная способность абсолютно черного тела.

Интегральный закон Кирхгофа:

$$\frac{R}{a} = R_0 = \int_0^\infty r_0(l,T)\,dl, \qquad (6.7)$$

где R_0 – энергетическая светимость абсолютно черного тела, для которого $a(l,T) = 1$ для всех длин волн и температур.

Закон Стефана–Больцмана:

$$R_0 = s\,T^4, \qquad (6.8)$$

где s – постоянная Стефана–Больцмана (табл. А.2 приложения А);

T – термодинамическая температура абсолютно черного тела.

Закон Вина:

$$r(w,T) = \frac{l^2}{2p\,c} r(l,T) = w^3 F\left(\frac{w}{T}\right), \qquad (6.9)$$

где $w = 2p\,c / l$ – циклическая частота излучения абсолютно черного тела;

c – скорость света (табл. А.2 приложения А);

$F(w/T)$ – некоторая функция, зависящая от модели механизма излучения.

Закон смещения Вина–Голицына:

$$l_{\max} T = b, \qquad (6.10)$$

где $l_{\max}$ – длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела при температуре T;

b – постоянная Вина (табл. А.2 приложения А).

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры:

$$r_{\max}(l,T) = CT^5, \qquad (6.11)$$

где C – вторая постоянная Вина (табл. А.2 приложения А).

Согласно гипотезе Планка, энергия элементарных излучателей (осцилляторов) принимает квантованные значения:

$$E_n = nh\nu, \quad n = 0, 1, 2, \ldots, \qquad (6.12)$$

где $h = 2p\,\mathbf{h}$ – постоянная Планка (табл. А.2 приложения А).

n – частота излучения.

Энергия фотона:

$$E = h\nu = \mathbf{h}w = \frac{hc}{l}, \qquad (6.13)$$

где $w = 2pn$ – циклическая частота фотона;

l – длина волны фотона.

Импульс фотона:

$$\mathbf{p} = \mathbf{h}\mathbf{k}, \quad p = \mathbf{h}k = \frac{h}{l}, \qquad (6.14)$$

где $\mathbf{k}$ – волновой вектор фотона;

$k = |\mathbf{k}| = 2p / l$ – волновое число фотона.

Давление света при нормальном падении на поверхность:

$$p = \frac{E_э}{c}(1 + r) = w(1 + r), \qquad (6.15)$$

где $E_э$ – энергетическая освещенность поверхности (формула (6.3));

w – объемная плотность энергии излучения;

r – коэффициент отражения.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = eU_з + A_{вых} = T_{\max} + A_{вых}, \qquad (6.16)$$

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

e – заряд электрона;

$U_з$ – задерживающая разность потенциалов, определяющая максимальную кинетическую энергию $T_{\max}$ фотоэлектронов;

$T_{\max} = \dfrac{m_e v_{\max}^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, когда $h\nu = m_e c^2 = 0{,}511$ МэВ;

$T_{\max} = m_e c^2 \left[\dfrac{1}{\sqrt{1 - v_{\max}^2 / c^2}} - 1\right]$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, когда энергия фотона $h\nu$ сравнима или больше собственной энергии электрона $m_e c^2 = 0{,}511$ МэВ;

$v_{\max}$ – максимальная скорость фотоэлектрона;

$A_{вых}$ – работа выхода электрона.

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A_{вых}}{h} \text{ или } l_0 = \frac{hc}{A_{вых}}, \qquad (6.17)$$

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

l_0 – максимальная длина волны света, при которой еще

возможен фотоэффект.

Эффект Комптона:

$$\Delta l = l' - l = l_C(1-\cos J) = 2 l_C \sin^2 \frac{J}{2}, \qquad (6.18)$$

где Δl – изменение длины волны фотона, рассеявшегося на электроне (или микрочастице массы m);

l' – длина волны фотона, рассеянного на угол J после столкновения с электроном;

l – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабо связанным электроном;

l_C – комптоновская длина волны электрона:

$$l_C = \frac{h}{m_e c} \approx 2,426 \text{ пм}. \qquad (6.19)$$

Импульс частицы или фотона:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-\mathbf{v}^2/c^2}} = \mathbf{h}\mathbf{k}, \qquad (6.20)$$

где m_0 – масса покоя частицы;

$\mathbf{k}$ – волновой вектор.

Энергия частицы или фотона:

$$E = c\sqrt{\mathbf{p}^2 + m_0^2 c^2} = mc^2 = hn = \mathbf{h}w, \qquad (6.21)$$

где m – эффективная масса частицы или масса, соответствующая энергии фотона;

$w = 2pn$ – циклическая частота волны, соответствующей материальной частицы, или циклическая частота света.

Длина волны де Бройля материальной частицы:

$$l = \frac{2p}{k} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \qquad (6.22)$$

где $k = |\mathbf{k}|$ – волновое число;

$p = mv$ – величина импульса частицы.

Соотношение неопределенностей Гайзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \text{ ‰ } \mathbf{h}, \ \ \Delta y \cdot \Delta p_y \text{ ‰ } \mathbf{h}, \ \ \Delta z \cdot \Delta p_z \text{ ‰ } \mathbf{h}, \qquad (6.23)$$

где Δx, Δy, Δz – неопределенности в координатах частицы;

Δp_x, Δp_y, Δp_z – неопределенности в проекциях импульса частицы на оси координат.

Первый постулат Бора. ***Среди всех мыслимо возможных состояний движения атомной системы существует ряд так называемых* стационарных состояний, *которые обладают своеобразной устойчивостью, необъяснимой в рамках классической теории, в результате чего всякое изменение движения системы должно состоять в переходе из одного стационарного состояния в другое.***

Второй постулат Бора (правило частот). ***В самих стационарных состояниях, в противоречии с классической электромагнитной теорией, атом не излучает.***

Однако процесс перехода между двумя стационарными состояниями может сопровождаться испусканием электромагнитного излучения, обладающего теми же свойствами, что и излучение, посылаемое согласно классической теории электрически заряженной частицей, совершающей гармонические колебания с постоянной частотой. Однако эта частота не находится в простом отношении к движению атома, а определяется условием

$$hn = E' - E'', \qquad (6.24)$$

где h – постоянная Планка;

E' и E'' – значения энергии атома в двух стационарных состояниях, представляющих соответственно начальное и конечное состояние атома в процессе излучения.

Облучение атома электромагнитными волнами этой частоты может привести к процессу излучения, переводящему атом из конечного состояния в начальное.

Момент импульса электронов атома, движущихся по круговым орбитам, может принимать дискретный ряд значений, соответствующим стационарным состояниям атома:

$$L_n = m_e v_n r_n = n\mathbf{h}, \ \ n = 1, 2, 3, ..., \qquad (6.25)$$

где m_e – масса электрона;

v_n – скорость электрона на орбите;

r_n – радиус орбиты;

n – главное квантовое число.

Энергия электрона в атоме водорода:

$$E_n = -\frac{E_{\text{Н}}}{n^2}, \qquad (6.26)$$

где $E_{\text{Н}} = hR = \mathbf{h}R''$ – энергия ионизации атома водорода;

$R = R'c = R''/2p$ – постоянная Ридберга (табл. А.2 приложения А).

Формула Бальмера для водородоподобных атомов:

$$\frac{1}{l_{mn}} = R'Z^2\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right), \qquad (6.27)$$

где Z – заряд ядра;

$m = n+1,\ n+2,\ldots$ – квантовое число, характеризующее уровни серии, лежащие выше уровня с квантовым числом n.

Примеры решения задач

Задача 1. Определить длину волны излучения абсолютно черного тела, соответствующую максимальной спектральной плотности энергетической светимости, равной $r_{\max}(l,T) = 1,3\cdot10^{11}$ Вт/м^3.

Решение. Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости $r_{\max}(l,T)$ абсолютно черного тела от температуры T определяется формулой

$$r_{\max}(l,T) = CT^5, \qquad (1)$$

где C – вторая постоянная Вина (табл. А.2 приложения А).

Из формулы (1) находим температуру:

$$T = \sqrt[5]{\frac{r_{\max}(l,T)}{C}}. \qquad (2)$$

Согласно закону смещения Вина, длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, равна

$$l_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{b}{\sqrt[5]{\frac{r_{\max}(l,T)}{C}}}, \qquad (3)$$

где b – первая постоянная Вина (табл. А.2 приложения А).

Подставив в полученную формулу (3) числовые значения, получим искомую длину волны:

$$l_{\max} = \frac{2,9\cdot10^{-3}}{\sqrt[5]{1,3\cdot10^{11}/1,3\cdot10^{-5}}}\ \text{м} = 1,83\ \text{мкм}.$$

Ответ: $l_{\max} = 1,83$ мкм.

Задача 2. Вольфрам, работа выхода электронов из которого равна $A_{\text{вых}} = 4,54$ эВ, облучается фотонами с энергией $E_g = 12$ эВ. Найти задерживающую разность потенциалов для фотоэлектронов, вылетающих из вольфрама.

Решение. Согласно уравнению Эйнштейна:

$$E_g = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}. \qquad (1)$$

С другой стороны, максимальная скорость фотоэлектронов определяется задерживающей разностью потенциалов:

$$\frac{mv^2}{2} = eV_{\text{з}}. \qquad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), находим $eV_{\text{з}} = E_g - A_{\text{вых}}$, откуда получаем:

$$V_{\text{з}} = \frac{E_g - A_{\text{вых}}}{e} = \frac{12-4,54}{1}\ \text{В} = 7,46\ \text{В},$$

где учтено, что если энергия измеряется в электронвольтах, то заряд электрона равен одной единице заряда.

Ответ: $V_{\text{з}} = \dfrac{E_g - A_{\text{вых}}}{e} = 7,46$ В.

Задача 3. Максимальная кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка $T = 10$ эВ. Используя соотношение неопределенностей Гайзенберга, оценить минимальные размеры атома.

Решение. В соотношении неопределенностей Гайзенберга

$$\Delta x\cdot\Delta p_x \text{ ‰ } \mathbf{h} \qquad (1)$$

Δx представляет неопределенность координаты электрона, а Δp_x – неопределенность его импульса. Если атом имеет диаметр d, то так как электрон может находиться в любой точке внутри

атома, находящейся на расстоянии не больше $d/2$ от центра атома, неопределенность координаты электрона равна

$$\Delta x = \frac{d}{2}. \qquad (2)$$

Из выражений (2) и (1) тогда следует, что

$$d \text{ ‰ } \frac{2\mathbf{h}}{\Delta p_x}. \qquad (3)$$

Импульс электрона связан с кинетической энергией соотношением $p_x = \sqrt{2mT}$ и имеет неопределенность, связанную с тем, что он может принимать значения от $p_x = 0$ до максимального значения. Следовательно,

$$\Delta p_x \le p_x = \sqrt{2mT}. \qquad (4)$$

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

$$d \text{ ‰ } d_{\min} = \frac{2\mathbf{h}}{p_x} = \frac{2\mathbf{h}}{\sqrt{2mT}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} \text{ м} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,123 \text{ нм}.$$

Ответ: $d_{\min} = \dfrac{2\mathbf{h}}{\sqrt{2mT}} = 0,123$ нм.

Задача 4. Какова была длина волны l_0 рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом $j = 60°$ длина волны рассеянного излучения оказалась равной $l = 25,4$ пм?

Решение. Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском рассеянии определяется по формуле

$$l - l_0 = 2 l_{\text{C}} \sin^2\left(\frac{j}{2}\right), \qquad (1)$$

где l_0 и l – длины волн падающего и рассеянного излучения;

$l_{\text{C}} = h / m_e c$ – комптоновская длина волны электрона;

h – постоянная Планка;

m_e – масса электрона;

c – скорость света в вакууме.

Из формулы (1) находим длину волны падающего рентгеновского излучения

$$l_0 = l - 2 l_{\text{C}} \sin^2\left(\frac{j}{2}\right). \qquad (2)$$

Подставляя в эту формулу данные из условия задачи и значение комптоновской длины волны из табл. А.2 приложения А, получаем:

$$l_0 = 25,4 - 2 \cdot 2,43 \cdot \sin^2(30°) \text{ пм} = 23,8 \text{ пм}.$$

Ответ: $l_0 = l - 2 l_{\text{C}} \sin^2\left(\dfrac{j}{2}\right) = 23,8$ пм.

Задача 5. Электрон и протон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов, равную $U = 1,0$ МВ. Какая из этих частиц имеет большую длину волн де Бройля и во сколько раз?

Решение. Связь длины волны де Бройля l_{B} частицы с ее импульсом p определяется формулой

$$l_{\text{B}} = \frac{h}{p}. \qquad (1)$$

Найдем длину волны де Бройля для электрона.

Кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U, равна

$$E_{\text{к}} = |e| U = 1,0 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}. \qquad (2)$$

Энергия покоя электрона равна

$$E_0 = m_e c^2 = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 0,511 \text{ МэВ}. \qquad (3)$$

Так как кинетическая энергия $E_{\text{к}}$ электрона значительно превышает энергию покоя E_0 электрона, то в данном случае имеем дело с релятивистской частицей.

Импульс релятивистской частицы связан с ее кинетической энергией соотношением

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E_{\text{к}}(E_{\text{к}} + 2E_0)}. \qquad (4)$$

Подставляя значения выражений (2) и (3) в формулу (4), на-

ходим искомую длину волны де Бройля для электрона:

$$l_{\text{В},e} = \frac{hc}{\sqrt{E_{\text{к}}(E_{\text{к}} + 2E_0)}} = \\ = \frac{6,63\cdot 10^{-34}\cdot 3\cdot 10^{8}}{\sqrt{1,6\cdot 10^{-13}\cdot(1,6\cdot 10^{-13} + 2\cdot 8,2\cdot 10^{-14})}}\,\text{м} = 8,73\cdot 10^{-13}\,\text{м}. \quad (5)$$

Найдем длину волны де Бройля протона.

Кинетическая энергия протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U, так же как и электрона равна

$E_{\text{к}} = 1,0\,\text{МэВ} = 1,6\cdot 10^{-13}$ Дж.

Энергия покоя протона:

$$E_0 = m_p c^2 = \frac{1,67\cdot 10^{-27}\cdot 3\cdot 10^{16}}{1,6\cdot 10^{-19}}\,\text{эВ} = 938\,\text{МэВ} = 15,0\cdot 10^{-27}\ \text{Дж}.$$

Так как энергия покоя E_0 протона значительно превышает кинетическую энергию $E_{\text{к}}$ протона, то в данном случае протон рассматривается как нерелятивистская частица.

Для нерелятивистской частицы импульс определяется формулой

$$p = \sqrt{2m_p E_{\text{к}}}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в (1), получаем искомую длину волны де Бройля для протона:

$$l_{\text{В},p} = \frac{h}{\sqrt{2m_p E_{\text{к}}}} = \frac{6,63\cdot 10^{-34}}{\sqrt{2\cdot 1,6\cdot 10^{-13}\cdot 1,67\cdot 10^{-27}}}\,\text{м} = 2,84\cdot 10^{-14}\,\text{м}. \quad (7)$$

Разделив значение выражения (5) на (7), получим:

$$\frac{l_{\text{В},e}}{l_{\text{В},p}} = \frac{87,3}{2,84} = 30,74.$$

Таким образом, получили, что при ускоряющей разности потенциалов $U = 1,0\,\text{МВ}$ длина волны де Бройля электрона в 30,74 раза больше длины волны де Бройля протона.

Ответ: $\dfrac{l_{\text{В},e}}{l_{\text{В},p}} = 30,74.$

Задача 6. Определить частоту света, излучаемого атомом

водорода, при переходе электрона на третий энергетический уровень, если радиус орбиты электрона изменился в $k = 9$ раз.

Решение. Частота света, излучаемого атомом водорода, согласно обобщенной формуле Бальмера, определяется формулой

$$n_{nm} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right). \quad (1)$$

где R – постоянная Ридберга (табл. А.2 приложения А);

n – номер орбиты, на которую переходит электрон, по условию задачи $n = 3$;

m – номер орбиты, с которой переходит электрон.

На электрон, движущийся со скоростью v_n по окружности радиуса r_n, действует кулоновская сила $F_{\text{Кул}}$ со стороны ядра, уравновешиваемая центробежной силой инерции $F_{\text{цб}}$, откуда следует равенство:

$$\frac{e^2}{4pe_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}. \quad (2)$$

Следовательно, радиус n-й орбиты равен

$$r_n = \frac{e^2}{4pe_0 m_e v_n^2}. \quad (3)$$

Равенство (3) можно переписать в виде

$$m_e v_n r_n = \frac{e^2}{4pe_0 v_n}. \quad (4)$$

Из первого постулата теории Бора следует, что момент импульса электрона, движущегося по n-й орбите, определяется формулой

$$m_e v_n r_n = n\mathbf{h},\ \ n = 1, 2, 3, \ldots. \quad (5)$$

Из равенства правых частей формул (4) и (5) получаем выражение для скорости движения электрона по n-й орбите:

$$v_n = \frac{e^2}{4pe_0 \mathbf{h} n}, \quad (6)$$

подставляя которое в формулу (3), находим выражение для радиуса орбиты:

$$r_n = \frac{4pe_0\hbar^2 n^2}{e^2 m_e}. \qquad (7)$$

Из этой формулы находим отношение радиусов орбит:

$$\frac{r_m}{r_n} = \frac{m^2}{n^2}. \qquad (8)$$

По условию задачи $r_m / r_3 = 9$. Поэтому из формулы (8) следует $m = 9$, т. е. электрон перешел с девятой орбиты на третью.

Наконец, подставляя значения $n = 3$ и $m = 9$ в формулу Бальмера, определяем частоту излучаемого фотона:

$$n_{nm} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{9^2}\right) = \frac{8R}{81} = \frac{8 \cdot 3,29 \cdot 10^{15}}{81}\ \text{Гц} = 3,25 \cdot 10^{14}\ \text{Гц}.$$

Ответ: $n_{nm} = 3,25 \cdot 10^{14}$ Гц.

РАЗДЕЛ 7. **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Основные формулы

Основные формулы молекулярно-кинетической теории используются как в физике, так и в химии.

Относительная атомная масса A_r химического элемента:

$$A_r = \frac{M_A}{\frac{1}{12} M_{^{12}C}}, \qquad (6.28)$$

где M_A – масса атома этого элемента;

$M_{^{12}C}$ – масса атома изотопа угдерода ^{12}C.

Относительная молекулярная (молярная) масса M_r вещества:

$$M_r = \frac{M_M}{\frac{1}{12} M_{^{12}C}}, \qquad (6.29)$$

где M_M – масса молекулы этого вещества.

Атомная единица массы:

$$m_{ед} = \frac{1}{12} M_{^{12}C} = 1\ \text{а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}. \qquad (6.30)$$

Количество вещества определяется количеством атомов, молекул или ионов, из которых оно состоит. Единицей количества вещества является *моль*, или *грамм-молекула*, равная количеству вещества, в котором содержится число частиц (атомов, молекул или других структурных составляющих), равное числу атомов, содержащихся в 12 г изотопа углерода ^{12}C.

В одном моле любого вещества содержится одинаковое число частиц (атомов или молекул), которое называется *числом Авогадро*:

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}. \qquad (6.31)$$

Молярная масса вещества:

$$m = N_A M_r m_{ед}\ \text{(кг/моль)}. \qquad (6.32)$$

Количество вещества в молях:

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{m}, \qquad (6.33)$$

где m – масса вещества, содержащая N молекул.

Линейное тепловое расширение твердых тел описывается законом:

$$l = l_0[1 + a(t - t_0)], \qquad (6.34)$$

где l – длина тела при температуре t;

l_0 – длина тела при температуре t_0 (обычно $t_0 = 0\,°\text{C}$);

a – коэффициент линейного расширения.

Объемное тепловое расширение твердых тел, жидкостей и газов описывается законом:

$$V = V_0[1 + b(t - t_0)], \qquad (6.35)$$

где V – объем вещества при температуре t;

V_0 – объем вещества при температуре t_0 (обычно $t_0 = 0\,°\text{C}$);

b – коэффициент объемного расширения (для твердых тел $b \approx 3a$).

Средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа:

$$\overline{e} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT, \qquad (6.36)$$

где m_0 – масса молекулы;

$\overline{v^2}$ – средний квадрат скорости молекулы (квадрат среднеквадратичной скорости):

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{m}}, \qquad (6.37)$$

где $R = N_A k$ – универсальная газовая постоянная (табл. А.2 приложения А);

k – постоянная Больцмана (табл. А.2 приложения А);

T – абсолютная температура газа.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов:

$$pV = \frac{2}{3}E_{\text{к}} = \frac{2}{3}\sum_{i=1}^{N}\frac{m_0 v_i^2}{2} = \frac{1}{3}Nm_0\overline{v^2}, \qquad (6.38)$$

где p – давление газа, состоящего из N одинаковых молекул массы m_0;

V – объем газа;

$E_{\text{к}}$ – суммарная кинетическая энергия молекул газа;

v_i – скорость i-й молекулы.

Закон Авогадро. ***При нормальных условиях, соответствующих температуре*** $\mathbf{t_0 = 0\,°C}$ $\mathbf{(T_0 = 273{,}15\ K)}$ ***и давлению*** $\mathbf{p = 1}$ **атм (=** $\mathbf{1{,}01325 \times 10^5}$ **Па),** ***объем 1 моля любого газа равен*** $\mathbf{V_m = 22{,}41383}$ **л/моль.**

Закон Бойля–Мариотта (изотермический процесс, $T = \text{const}$):

$$pV = \text{const}, \text{ или } p_1V_1 = p_2V_2 = p_3V_3 = \ldots. \qquad (6.39)$$

Закон Гей–Люссака (изобарический процесс, $p = \text{const}$):

$$V = V_0[1 + a_{\text{V}}(t - t_0)], \text{ или } \frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \ldots = \text{const}, \qquad (6.40)$$

где V_0 – объем газа при температуре $T_0 = 273{,}15$ K ($t_0 = 0\,°\text{C}$);

$a_{\text{V}} = 1/T_0$ – термический коэффициент объемного расширения, одинаковый для всех идеальных газов;

V_i – объем газа при температуре $T_i = t_i + T_0$.

Закон Шарля (изохорический процесс, $V = \text{const}$):

$$p = p_0[1 + a_{\text{p}}(t - t_0)], \text{ или } \frac{p_0}{T_0} = \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \ldots = \text{const}, \qquad (6.41)$$

где p_0 – давление газа при температуре $T_0 = 273{,}15$ K ($t_0 = 0\,°\text{C}$);

a_{p} – термический коэффициент давления, различный для разных идеальных газов;

p_i – давление газа при температуре $T_i = t_i + T_0$.

Уравнение Клапейрона–Менделеева:

$$pV = \frac{m}{m}RT. \qquad (6.42)$$

Закон парциальных давлений Дальтона:

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_N, \qquad (6.43)$$

где p – давление смеси, состоящей из N идеальных газов, занимающей некоторый объем $V = \text{const}$;

p_i – (парциальное) давление i-го газа, занимающего этот же объем.

Барометрическая формула:

$$p(z) = p_0 e^{-\frac{m_0 gz}{kT}} = p_0 e^{-\frac{mgz}{RT}}, \qquad (6.44)$$

где p – давление газа на высоте z;

p_0 – давление газа на высоте $z = 0$;

m_0 – масса молекулы;

m – молярная масса газа.

Внутренняя энергия термодинамической системы:

$$U = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}, \qquad (6.45)$$

где $E_{\text{к}}$ – суммарная кинетическая энергия молекул;

$E_{\text{п}}$ – суммарная потенциальная энергия взаимодействия молекул (для идеального газа $E_{\text{п}} = 0$).

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа:

$$U = E_{\text{к}} = N\overline{e} = \frac{im}{2m}RT, \qquad (6.46)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа ($i = 3$ для одноатомного газа, $i = 5$ для двухатомного газа, $i = 6$ для газа, состоящего из многоатомных молекул).

Теплоемкость тела:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \qquad (6.47)$$

где ΔQ – количество теплоты, необходимое для изменения температуры тела на ΔT.

Удельная теплоемкость вещества:

$$c = \frac{C}{m}, \qquad (6.48)$$

где m – масса тела.

Молярная теплоемкость вещества:

$$C_m = cm, \qquad (6.49)$$

где m – молярная масса вещества.

Удельные теплоемкости идеального газа при постоянном объеме c_V и постоянном давлении c_p:

$$c_V = \frac{iR}{2m}; \; c_p = \frac{(i+2)R}{2m}. \qquad (6.50)$$

Уравнение Майера для молярных теплоемкостей:

$$C_p - C_V = R. \qquad (6.51)$$

Уравнения Пуассона для адиабатического процесса:

$$pV^g = \text{const}, \text{ или } TV^{g-1} = \text{const}, \qquad (6.52)$$

где $g = \frac{c_p}{c_V}$ – показатель адиабаты.

Работа расширения идеального газа:

1) $A = \int_{V_1}^{V_2} pdV$ – в общем случае; (6.53)

2) $A = 0$ – в изохорическом процессе; (6.54)

3) $A = p(V_2 - V_1)$ – в изобарическом процессе; (6.55)

4) $A = \frac{m}{m} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ – в изотермическом процессе; (6.56)

5) $A = -\Delta U = \frac{1}{g-1}(p_1V_1 - p_2V_2) = -C_V \Delta T$ – в адиабатическом процессе. (6.57)

Первое начало термодинамики. ***Количество теплоты*** D***Q, полученное телом, расходуется на изменение*** D***U внутренней энергии системы и на совершение системой работы*** D***A против внешних сил:***

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A = \Delta U + p\Delta V. \qquad (6.58)$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины:

$$h = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \le h_0, \qquad (6.59)$$

где A – работа, совершенная рабочим телом в течение цикла;

Q_1 – теплота, полученная рабочим телом от теплоотдатчика (нагревателя), имеющего температуру T_1;

Q_2 – теплота, переданная рабочим телом теплоприемнику (холодильнику), имеющим температуру T_2;

h_0 – термический КПД цикла Карно:

$$h_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (6.60)$$

Второе начало термодинамики. ***Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача тепла от менее нагретого тела к более нагретому.***

Количество теплоты Q, необходимое для нагревания вещества ($Q_{нагр} = Q > 0$), выделяемое при охлаждении вещества ($Q_{охл} = -Q < 0$):

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T, \qquad (6.61)$$

где c – удельная теплоемкость вещества;

$T_2 = t_2 + 273{,}15$ (К) – конечная абсолютная температура вещества;

$T_1 = t_1 + 273{,}15$ (К) – начальная абсолютная температура вещества.

Количество теплоты Q, необходимое для испарения жидко-

сти $(Q_{исп} = Q > 0)$ или для конденсации газа в жидкость $(Q_{конд} = -Q < 0)$:

$$Q = Lm, \qquad (6.62)$$

где L – удельная теплота парообразования (конденсации);

m – масса испаряемой жидкости или конденсируемого газа.

Количество теплоты Q, необходимое для плавления твердого тела $(Q_{пл} = Q > 0)$ или для кристаллизации (затвердевания) жидкости $(Q_{крист} = -Q < 0)$:

$$Q = l\,m, \qquad (6.63)$$

где l – удельная теплота плавления (кристаллизации);

m – масса плавящегося твердого тела или кристаллизируемой жидкости.

Количество теплоты Q, необходимое для сгорания (возгонки, сублимации) твердого тела $(Q_{субл} = Q > 0)$ или для конденсации газа $(Q_{конд} = -Q < 0)$:

$$Q = rm, \qquad (6.64)$$

где r – удельная теплота испарения, или сгорания твердого тела;

m – масса испаряемого твердого тела.

Смесь различных веществ, каждое из которых может находиться одновременно в газообразном состоянии, жидком состоянии и твердом состоянии с различными температурами, состоит из газовых, жидких и твердых состояний этих веществ, имеющих температуру T, которая определяется из уравнения теплового баланса: ***количество теплоты, выделяемое при охлаждении и фазовых переходах веществ термодинамической системы, находящихся при температурах выше температуры смеси, до температуры смеси, температуры кристаллизации или температуры конденсации, расходуется на нагревание и фазовые переходы веществ термодинамической системы, находящихся при температурах ниже температуры смеси, до температуры смеси, температуры испарения или температуры сублимации.***

Насыщенный пар не отличается от обычного газа и подчиняется уравнению состояния Клапейрона–Менделеева, которое удобно записать в виде

$$r_{насыщ} = \frac{m\,p}{RT}, \qquad (6.65)$$

где $r_{насыщ}$ – плотность насыщенного пара;

m – молярная масса вещества;

p – давление пара;

T – температура пара.

Масса водяных паров, содержащихся в 1 м^3, называется абсолютной влажностью воздуха $r_{пара}$.

Относительная влажность воздуха

$$r = \frac{r_{пара}}{r_{насыщ}} = \frac{p_{пара}}{p_{насыщ}}, \qquad (6.66)$$

где $r_{насыщ}$ – количество водяного пара, необходимое для насыщения 1м^3 воздуха при данной температуре, или плотность насыщенного пара;

$p_{пара}$ – давление водяного пара;

$p_{насыщ}$ – давление насыщенного водяного пара. При температуре кипения воды $t = 100$ °C давление насыщенного водяного пара равно атмосферному $p_{насыщ} = p_0$.

Точка росы – температура, при которой водяные пары становятся насыщающими.

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости:

$$s = \frac{\Delta A}{\Delta S} = \frac{\Delta F}{\Delta l}, \qquad (6.67)$$

где ΔA – работа, необходимая для изотермического увеличения площади поверхности жидкости на величину ΔS;

ΔF – сила поверхностного натяжения, действующая на длину Δl периметра смачивания.

Для смачивающих или несмачивающих жидкостей, соприкасающихся с сосудом, в который они налиты, возникает искривление поверхности жидкости (мениск), приводящее к дополнительному давлению Δp по сравнению с давлением под плоской поверхностью:

$$\Delta p = \pm \frac{2s}{R}, \qquad (6.68)$$

где $\Delta p > 0$ – для несмачивающей жидкости (выпуклый мениск);

$\Delta p < 0$ – для смачивающей жидкости (вогнутый мениск);

s – коэффициент поверхностного натяжения;

R – радиус сферической поверхности.

Внутри сферического пузыря, находящегося в жидкости, дополнительное давление $\Delta p_{\text{сф}}$ равно

$$\Delta p_{\text{сф}} = \frac{2s}{R}, \qquad (6.69)$$

где s – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

R – радиус пузыря.

Внутри сферической жидкой пленки (мыльного пузыря) радиуса R дополнительное давление $\Delta p_{\text{сф}}$ равно

$$\Delta p_{\text{сф}} = \frac{4s}{R}. \qquad (6.70)$$

Высота h столба жидкости в капилляре радиуса r:

$$h = \pm \frac{2s}{r\,gr}, \qquad (6.71)$$

где $h > 0$ – для смачивающей жидкости;

$h < 0$ – для несмачивающей жидкости;

r – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Примеры решения задач

Задача 1. Ампула объемом $V = 1\,\text{см}^3$, содержащая воздух при нормальных условиях, оставлена в космосе, где давление можно считать равным нулю. В ампуле пробито отверстие. Через какое время t давление в ампуле станет равным нулю, если считать, что через отверстие в единицу времени вылетает $n_t = 10^8\ \text{с}^{-1}$ молекул воздуха?

Решение. Давление в ампуле станет равным нулю, когда в ампуле не останется ни одной молекулы воздуха. Считая все молекулы воздуха одинаковыми, вычислим вначале число молекул,

содержащихся в объеме V. Так как при нормальных условиях объем $V_0 = 22,4\ \text{л} = 22,4 \cdot 10^{-3}\ \text{м}^3$ содержит $N_{\text{A}} = 6,022045 \cdot 10^{23}$ молекул, то в объеме $V = 1\,\text{см}^3 = 10^{-6}\ \text{м}^3$ содержится $N = N_{\text{A}} V / V_0$ молекул. Если известна скорость вылета молекул n_t, то время t, затраченное на вылет всех N молекул, будет равно

$$t = \frac{N}{n_t} = \frac{N_{\text{A}} V}{n_t V_0} = \frac{6,022045 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-6}}{10^8 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}}\ \text{с} = 2,688 \cdot 10^{11}\ \text{с}.$$

Разделив это число на среднюю продолжительность юлианского года в секундах, получим:

$$t = \frac{2,688 \cdot 10^{11}}{365,25 \cdot 24 \cdot 3600}\ \text{лет} = 8520\ \text{лет}.$$

Ответ: $t = \dfrac{N_{\text{A}} V}{n_t V_0} \approx 8520\ \text{лет}.$

Задача 2. При температуре $t = 0\ ^\circ\text{C}$ длины алюминиевого и железного стержней равны $L_0^{\text{Al}} = 50\ \text{см}$ и $L_0^{\text{Fe}} = 50,05\,\text{см}$. Сечения стержней одинаковы. При какой температуре t_1 длины стержней и при какой температуре t_2 их объемы будут одинаковы? Коэффициент линейного расширения алюминия $a_{\text{Al}} = 2,4 \cdot 10^{-5}\ \text{К}^{-1}$, железа $a_{\text{Fe}} = 1,2 \cdot 10^{-5}\ \text{К}^{-1}$.

Решение. Длины алюминиевого и железного стержней при температуре t_1 задаются формулами:

$$L^{\text{Al}} = L_0^{\text{Al}}[1 + a_{\text{Al}}(t_1 - t)] = L_0^{\text{Al}}[1 + a_{\text{Al}} t_1],$$

$$L^{\text{Fe}} = L_0^{\text{Fe}}[1 + a_{\text{Fe}}(t_1 - t)] = L_0^{\text{Fe}}[1 + a_{\text{Fe}} t_1].$$

Из условия равенства этих длин $L^{\text{Al}} = L^{\text{Fe}}$ получаем:

$$t_1 = \frac{L_0^{\text{Fe}} - L_0^{\text{Al}}}{a_{\text{Al}} L_0^{\text{Al}} - a_{\text{Fe}} L_0^{\text{Fe}}} = \frac{50,05 - 50}{2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 50 - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 50,05}\ ^\circ\text{C} = 83,4\ ^\circ\text{C}.$$

Объемы алюминиевого и железного стержней при температуре t_2 задаются формулами:

$$V^{\text{Al}} = V_0^{\text{Al}}[1 + b_{\text{Al}}(t_2 - t)] = V_0^{\text{Al}}[1 + b_{\text{Al}} t_2],$$

$$V^{\text{Fe}} = V_0^{\text{Fe}}[1 + b_{\text{Fe}}(t_2 - t)] = V_0^{\text{Fe}}[1 + b_{\text{Fe}}t_2],$$

где по условию задачи $V_0^{\text{Al}} = L_0^{\text{Al}}S$, $V_0^{\text{Fe}} = L_0^{\text{Fe}}S$, S – сечение алюминиевого и железного стержней. Так как коэффициент объемного расширения примерно в 3 раза больше коэффициента линейного расширения, то из условия равенства объемов $V^{\text{Al}} = V^{\text{Fe}}$ получаем

$$t_2 = \frac{V_0^{\text{Fe}} - V_0^{\text{Al}}}{b_{\text{Al}}V_0^{\text{Al}} - b_{\text{Fe}}V_0^{\text{Fe}}} = \frac{L_0^{\text{Fe}} - L_0^{\text{Al}}}{3(a_{\text{Al}}L_0^{\text{Al}} - a_{\text{Fe}}L_0^{\text{Fe}})} = \frac{t_1}{3} = 27{,}8\,°\text{C}.$$

Ответ: $t_1 = \dfrac{L_0^{\text{Fe}} - L_0^{\text{Al}}}{a_{\text{Al}}L_0^{\text{Al}} - a_{\text{Fe}}L_0^{\text{Fe}}} = 83{,}4\,°\text{C}$, $t_2 = \dfrac{t_1}{3} = 27{,}8\,°\text{C}$.

Задача 3. В цилиндре под поршнем массой $m = 6$ кг находится воздух. Поршень имеет форму, показанную на рис. 7.1. Площадь сечения цилиндра $S_0 = 20\,\text{см}^2$. Атмосферное давление $p_0 = 0{,}1$ МПа. Найти массу *M* груза, который надо положить на поршень, чтобы объем воздуха в цилиндре изотермически сжать в два раза. Трением пренебречь.

Решение. Чтобы решить задачу, рассмотрим, какие силы действуют на поршень. В отсутствие груза вес поршня *mg* и сила атмосферного давления p_0 уравновешиваются силой давления *p* воздуха под поршнем, занимающего объем *V*:

$$mg + p_0S_0 = pS\cos a, \qquad (1)$$

где $S = \dfrac{S_0}{\cos a}$ – площадь внутренней поверхности поршня.

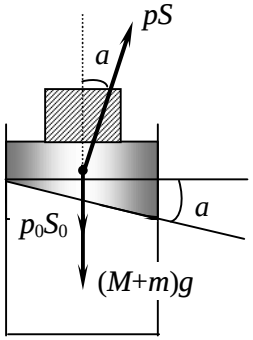

Рис. 7.1

Если на поршень положить груз массы *M*, то условие равновесия будет выглядеть как

$$(m + M)g + p_0S_0 = p_1S\cos a, \qquad (2)$$

где p_1 – давление воздуха под поршнем, занимающего по условию задачи объем $V_1 = \dfrac{V}{2}$.

Так как процесс изотермический, то воздух подчиняется закону Бойля–Мариотта $pV = p_1V_1$. Умножим уравнение (2) на V_1 и преобразуем его, используя уравнение (1):

$$[(m + M)g + p_0S_0]V_1 = \frac{[(m + M)g + p_0S_0]V}{2} = p_1V_1S\cos a =$$
$$= pVS\cos a = (mg + p_0S_0)V.$$

Отсюда находим, что масса *M* груза равна

$$M = m + \frac{p_0S_0}{g} = 6 + \frac{0{,}1\cdot 10^6\cdot 20\cdot 10^{-4}}{10}\,\text{кг} = 26\,\text{кг}$$

и не зависит от угла *a* среза внутренней поверхности поршня.

Ответ: $M = m + \dfrac{p_0S_0}{g} = 26$ кг.

Задача 4. В цилиндре двигателя внутреннего сгорания при работе образуются газы, температура которых $t_1 = 727\,°\text{C}$. Температура отработанного газа $t_2 = 100\,°\text{C}$. Двигатель расходует в единицу времени массу $m_t = 36$ кг/ч топлива. Какую максимальную полезную мощность может развивать этот двигатель? Удельная теплота сгорания топлива $r = 43$ МДж/кг.

Решение. Воспользуемся определением коэффициента полезного действия тепловой машины. Для двигателя внутреннего сгорания имеем

$$h = \frac{N}{Q_t} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где N – полезная работа, производимая двигателем в единицу времени (полезная развиваемая мощность);

$Q_t = rm_t$ – количество теплоты в единицу времени, выделяющееся при сгорании топлива;

$T_1 = (t_1 + 273)\,\text{K} = 1000\,\text{K}$, $T_2 = (t_2 + 273)\,\text{K} = 373\,\text{K}$.

Отсюда полезная мощность равна

$$N = rm_t\,\frac{T_1 - T_2}{T_1} = 43\cdot 10^6\cdot\frac{36}{3600}\cdot\frac{1000 - 373}{1000}\,\text{Вт} = 270\ \text{кВт}.$$

Ответ: $N = rm_t\,\dfrac{T_1 - T_2}{T_1} = 270$ кВт.

Задача 5. В чашке находилось $M = 500$ г льда при температуре $t_1 = -5$ °С. В нее вливают $m = 200$ г воды при температуре $t_2 = 80$ °С. Какая температура установится и что будет находиться в чашке? Удельная теплоемкость льда $c_л = 2100$ Дж/(кг · К), удельная теплоемкость воды $c_в = 4200$ Дж/(кг · К), удельная теплота плавления льда $l = 334$ кДж/кг.

Решение. Задачу будем решать с помощью уравнения теплового баланса. Так как температура вливаемой в чашку воды больше температуры льда, то некоторое количество льда нагреется до температуры $t_0 = 0$ °С, а некоторое количество воды охладится до этой же температуры. Для нагревания всего льда требуется количество теплоты

$$Q_1 = Mc_л(t_0 - t_1) = 0,5 \cdot 2100 \cdot [0 - (-5)] \text{ Дж} = 5250 \text{ Дж}.$$

Вода, остывая до температуры $t_0 = 0$ °С, отдает льду количество теплоты

$$Q_2 = mc_в(t_2 - t_0) = 0,2 \cdot 4200 \cdot [80 - 0] \text{ Дж} = 67200 \text{ Дж}.$$

Так как $Q_2 > Q_1$, то часть теплоты, отдаваемой водой, пойдет на плавление льда $Q_2 - Q_1 = l\Delta M$. Откуда количество ΔM расплавившегося льда равно

$$\Delta M = \frac{Q_2 - Q_1}{l} = \frac{67200 - 5250}{334000} \text{ кг} = 185 \text{ г}.$$

Следовательно, в чашке окажется $m + \Delta M = (200 + 185)$ г $= 385$ г воды и $M - \Delta M = (500 - 185)$ г $= 315$ г льда при температуре $t_0 = 0$ °С.

Ответ: в чашке окажется 385 г воды и 315 г льда при температуре $t_0 = 0$ °С.

Задача 6. На плите стоит кастрюля с водой. При нагревании температура воды увеличилась от $t_0 = 0$ °С до $t = 95$ °С за время $t = 1$ мин. Какая доля h теплоты, получаемой водой при нагревании, рассеивается в окружающем пространстве, если время остывания той же воды от $t = 95$ °С до $t_1 = 90$ °С равно $t_1 = 9$ мин?

Решение. При нагревании вода одновременно рассеивает некоторое количество теплоты $Q_р$, поэтому количество теплоты, полученное водой, равно

$$Q = c_в m(t - t_0) + Q_р.$$

Считая, что рассеяние тепла происходит равномерно и в единицу времени рассеивается количество теплоты q, найдем, что $Q_р = qt$.

При остывании воды количество отдаваемой теплоты, которая рассеивается в пространстве, очевидно, равно $c_в m(t - t_1) = qt_1$, откуда скорость рассеивания теплоты равна

$$q = \frac{c_в m(t - t_1)}{t_1}.$$

Доля рассеиваемой теплоты составляет

$$h = \frac{Q_р}{Q} = \frac{qt}{c_в m(t - t_0) + qt} = \frac{(t - t_1)t}{(t - t_0)t_1 + (t - t_1)t} =$$

$$= \frac{(95 - 90) \cdot 1}{(95 - 0) \cdot 9 + (95 - 90) \cdot 1} = 0,0058.$$

Ответ: доля рассеиваемой теплоты составляет $h = 0,0058$ или 0,58 %.

Задача 7. В сосуде находится воздух, относительная влажность которого при $t_0 = 10$ °С равна $r_0 = 60$ %. Определить относительную влажность воздуха после уменьшения его объема в $n = 3$ раза при нагревании до $t = 100$ °С. Плотность насыщающего пара при 10 °С равна $r_н(10°) = 9,4 \cdot 10^{-3}$ кг/м^3.

Решение. Абсолютная влажность воздуха до нагревания и сжатия равна $r_0 = r_0 r_н(t_0)$. После уменьшения объема воздуха в n раз его плотность увеличивается в n раз, т. е. $r = nr_0 = nr_0 r_н(t_0)$.

Так как давление насыщенного водяного пара при температуре кипения воды $t = 100$ °С равно атмосферному давлению $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па, то плотность насыщенного водяного пара при этой температуре $r_н(t)$ найдем из уравнения Клапейрона–

Менделеева:

$$r_{н}(t) = \frac{m p_0}{RT},$$

где $m = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса водяного пара;

$T = (t + 273)$ К.

Следовательно, искомая относительная влажность воздуха равна

$$r = \frac{r}{r_{н}(t)} = \frac{n r_0 r_{н}(t_0) RT}{m p_0} =$$

$$= \frac{3 \cdot 0,6 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 373}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 1,01 \cdot 10^5} \cdot 100\,\% = 2,9\,\%.$$

Ответ: $r = \dfrac{n r_0 r_{н}(t_0) RT}{m p_0} = 2,9\,\%.$

Задача 8. В дне сосуда со ртутью имеется круглое отверстие диаметра $d = 70$ мкм (рис. 7.2). При какой максимальной толщине h слоя ртути она еще не будет вытекать через это отверстие? Плотность ртути $r = 13,6$ г/см^3, коэффициент поверхностного натяжения ртути $s = 470$ мН/м.

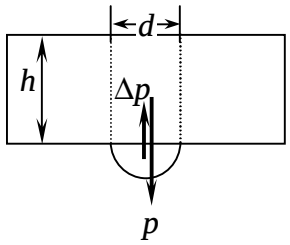

Рис. 7.2

Решение. Ртуть не начнет вытекать из отверстия, если давление столба ртути не превысит дополнительное давление, вызванное поверхностным натяжением:

$$p = \frac{mg}{S} = r\,gh < \Delta p = \frac{2s}{r} = \frac{4s}{d}.$$

Откуда находим толщину слоя ртути

$$h < \frac{4s}{r\,gd} = \frac{4 \cdot 470 \cdot 10^{-3}}{13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 70 \cdot 10^{-6}}\ \text{м} = 0,2\ \text{м}.$$

Ответ: $h < \dfrac{4s}{r\,gd} = 0,2$ м.

Задача 9. На дне пруда выделился пузырек газа диаметром $d_0 = 4,0$ мкм. При подъеме этого пузырька к поверхности воды его диаметр увеличился в $n = 1,1$ раза. Найти глубину пруда в

данном месте. Атмосферное давление нормальное, процесс расширения газа считать изотермическим. Коэффициент поверхностного натяжения воды $s = 73$ мН/м.

Решение. На дне пруда давление p_1 внутри пузырька равно сумме атмосферного давления p_0, давления столба воды ρgh и дополнительного давления Δp_1, обусловленного поверхностным натяжением:

$$p_1 = p_0 + r\,gh + \Delta p_1 = p_0 + r\,gh + \frac{2s}{r_0}, \qquad (1)$$

где r – плотность воды;

h – глубина пруда в месте возникновения пузырька;

s – коэффициент поверхностного натяжения воды;

$r_0 = d_0 / 2$ – радиус пузырька на дне водоема.

У поверхности воды давление p_2 внутри пузырька равно сумме только атмосферного давления p_0 и дополнительного давления Δp:

$$p_2 = p_0 + \Delta p = p_0 + \frac{2s}{r}, \qquad (2)$$

где $r = d / 2 = n d_0 / 2$ – радиус пузырька у поверхности.

Так как процесс расширения пузырька изотермический, то газ внутри пузырька подчиняется закону Бойля–Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \qquad (3)$$

где

$$V_1 = \frac{4}{3} p\, r_0^3 = \frac{p\, d_0^3}{6};\ \ V_2 = \frac{4}{3} p\, r^3 = \frac{p\, n^3 d_0^3}{6} = n^3 V_1. \qquad (4)$$

Подставляя выражения (1), (2) и (4) в (3), получаем соотношение:

$$p_1 V_1 = \left(p_0 + r\,gh + \frac{2s}{r_0} \right) V_1 = p_2 V_2 = n^3 \left(p_0 + \frac{2s}{r} \right) V_1.$$

Отсюда находим глубину пруда:

$$h = \frac{1}{r\,g} \left[(n^3 - 1) p_0 + \frac{4s\,(n^2 - 1)}{d_0} \right] =$$

$$= \frac{1}{10^3 \cdot 9,8}\left[((1,1)^3 - 1)\cdot 1,01325\cdot 10^5 + \frac{4\cdot 73\cdot 10^{-3}\cdot((1,1)^2-1)}{4,0\cdot 10^{-6}}\right] = 5\,\text{м}.$$

Ответ: $h = \frac{1}{r\,g}\left[(n^3-1)\,p_0 + \frac{4s\,(n^2-1)}{d_0}\right] = 5\,\text{м}.$

РАЗДЕЛ 8. **ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

Основные формулы

Энергия связи ядра:

$$\Delta E_{\text{св}} = c^2\Delta m = c^2[Zm_{\text{р}} + (A-Z)m_{\text{n}} - M_{\text{я}}], \qquad (6.72)$$

где c – скорость света (табл. А.2 приложения А);

Δm – дефект массы ядра;

Z – заряд ядра (число протонов в ядре);

$m_{\text{р}}$ – масса протона (табл. А.3 приложения А);

A – массовое число (число нуклонов в ядре), или атомный номер элемента;

m_{n} – масса нейтрона (табл. А.3 приложения А);

$M_{\text{я}}$ – масса ядра.

Ядерные реакции записываются в виде

$$^{A_1}_{Z_1}X_1 + {}^{A_2}_{Z_2}X_2 = {}^{A_3}_{Z_3}X_3 + {}^{A_4}_{Z_4}X_4, \qquad (6.73)$$

где $^{A_i}_{Z_i}X_i$ – ядро элемента с атомным номером A_i и зарядом ядра Z_i.

Закон сохранения заряда в ядерных реакциях:

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4. \qquad (6.74)$$

Закон сохранения числа нуклонов в ядерных реакциях:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \qquad (6.75)$$

Энергетический выход ядерной реакции:

$$E = c^2[(m_{X_1} + m_{X_2}) - (m_{X_3} + m_{X_4})], \qquad (6.76)$$

где m_{X_i} – масса ядра элемента X_i.

В силу закона сохранения заряда в этой формуле массы ядер можно заменить массами атомов.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-lt} = N_0 e^{-\frac{t}{t}} = N_0\, 2^{-\frac{t}{T}}, \qquad (6.77)$$

где N – число нераспавшихся радиоактивных ядер в момент времени t;

N_0 – число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$;

l – постоянная распада, или радиоактивная постоянная;

$T = \frac{\ln 2}{l}$ – период полураспада.

Активность радиоактивного вещества:

$$a = \frac{\Delta N}{\Delta t} = l\,N, \qquad (6.78)$$

где ΔN – число радиоактивных ядер, распавшихся за время Δt;

N – первоначальное число нераспавшихся радиоактивных ядер.

Единицы активности радиоактивного вещества:

беккерель: в системе СИ $[a] = 1\,\text{Бк} = 1\,\text{с}^{-1}$ – 1 распад в секунду;

кюри: $[a] = 1\,\text{Ки} = 3,7\cdot 10^{10}$ Бк.

Доза излучения (поглощенная доза излучения):

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{\Delta W}{r\Delta V}, \qquad (6.79)$$

где ΔW – энергия (поглощенного) излучения;

Δm – масса облучаемого вещества;

r – плотность облучаемого вещества;

ΔV – объем облучаемого вещества.

Единицы поглощенной дозы:

грэй: в системе СИ $[D] = 1\,\text{Гр} = 1\,\text{Дж/кг}$;

рад (rad – radiation absorbed dose): $[D] = 1\,\text{рад} = 10^{-2}$ Гр.

Мощность дозы излучения:

$$N = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \qquad (6.80)$$

где ΔD – доза излучения, поглощенного за время Δt.

Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучения:

$$J = \frac{\Delta Q}{\Delta m}, \qquad (6.81)$$

где ΔQ – суммарный заряд ионов, образовавшихся в результате ионизации излучением сухого воздуха при температуре 18 °С;

Δm – масса ионизированного воздуха.

Единицы экспозиционной дозы:

в системе СИ: $[J] = 1\,\text{Кл/кг} = 3876\,\text{Р}$;

рентген: доза в 1 Р накапливается за 1 ч на расстоянии 1 м от источника радия массой 1 г, т. е. активностью примерно 1 Ки:

$$[J] = 1\,\text{Р} = 2{,}58 \cdot 10^{-4}\ \text{Кл/кг} = 2{,}08 \cdot 10^{13}\ \frac{\text{пар ионов воздуха}}{\text{м}^3}.$$

Мощность экспозиционной дозы излучения:

$$N_э = \frac{\Delta J}{\Delta t}, \qquad (6.82)$$

где ΔJ – изменение экспозиционной дозы излучения, произошедшее за время Δt.

Эквивалентная доза облучения:

$$D_э = Q_г D, \qquad (6.83)$$

где $Q_г$ – коэффициент качества (КК), или относительная биологическая эффективность (ОБЭ) излучения;

D – поглощенная доза облучения.

Для b- и g-излучения $Q_b = Q_g = 1$, для a-излучения $Q_a = 20$, для протонов и быстрых нейтронов $Q_N = 3 \div 10$.

Единицы эквивалентной дозы облучения:

бэр (биологический эквивалент рада): $[D_э] = 1\,\text{бэр} = Q_г \cdot 1\,\text{рад}$;

зиверт: в системе СИ $[D_э] = 1\,\text{Зв} = 100\,\text{бэр}$.

Примеры решения задач

Задача 1. Вычислить дефект массы Δm и среднюю энергию связи ε ядра изотопа лития ^7_3Li, приходящуюся на один нуклон ядра.

Решение. Дефект массы задается формулой

$$\Delta m = Zm_р + (A - Z)m_n - M_я. \qquad (1)$$

Так как в справочных таблицах приводятся массы атомов, а не ядер, то преобразуем эту формулу, чтобы выразить дефект массы Δm через массу атома $M_а$. Масса атома $M_а$ очевидно равна сумме массы ядра $M_я$ и массы Zm_e, вращающихся вокруг него электронов, откуда следует

$$M_я = M_а - Zm_e. \qquad (2)$$

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

$$\Delta m = Z(m_р + m_e) + (A - Z)m_n - M_а = Zm_Н + (A - Z)m_n - M_а, \qquad (3)$$

где $m_Н = m_р + m_e = 1{,}00782504\,\text{а. е. м.}$ – масса атома водорода (табл. А.1 приложения А).

Из табл. А.3 приложения А находим массу нейтрона $m_n = 1{,}008665012\,\text{а. е. м.}$ и из табл. А.1 приложения А – массу изотопа лития ^7_3Li $(Z = 3,\ A = 7)$ $m(^7_3\text{Li}) = 7{,}01818\,\text{а. е. м.}$ Подставляя все массы в выражение (3) и учитывая, что $1\,\text{а.е.м.} = 931{,}5\,\text{МэВ/с}^2$, получаем:

$$\Delta m = Zm_Н + (A - Z)m_n - M_{Li} =$$
$$= 3 \cdot 1{,}00782504 + 4 \cdot 1{,}008665012 - 7{,}01818\ \text{а. е. м.} =$$
$$= 0{,}04\ \text{а. е. м.} = 37{,}26\ \text{МэВ/с}^2.$$

Соответственно, энергия связи равна

$$\Delta E_{св} = c^2 \Delta m = 37{,}26\ \text{МэВ}.$$

Так как в ядре изотопа лития ^7_3Li находится $A = 7$ нуклонов, то средняя энергия связи e, приходящаяся на один нуклон ядра, равна

$$e = \frac{\Delta E_{св}}{A} = \frac{37{,}26}{7}\ \text{МэВ/нуклон} = 5{,}323\ \text{МэВ/нуклон}.$$

Ответ: $\Delta m = 0{,}04\ \text{а.е.м.} = 37{,}26\ \text{МэВ/с}^2$;
$e = 5{,}323\ \text{МэВ/нуклон}$.

Задача 2. При соударении a-частицы с ядром бора $^{10}_5\text{B}$ произошла ядерная реакция, в которой образовалось ядро нового элемента, сопровождавшаяся вылетом протона. Записать символически данную реакцию, определить, ядро какого элемента об-

разовалось, и найти энергетический выход реакции.

Решение. a-частица представляет собой ядро атома гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, а протон – ядро атома водорода ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$. Обозначая неизвестное ядро через ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, данную реакцию можно записать в виде

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{10}_{5}\mathrm{B} \to {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X}.$$

Из закона сохранения числа нуклонов $4+10=1+A$ следует $A=13$, а из закона сохранения заряда $2+5=1+Z$ находим порядковый номер элемента $Z=6$, который соответствует углероду. Следовательно, в результате данной реакции образовалось ядро изотопа углерода ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$.

Энергетический выход реакции определяется по формуле

$$E = c^2[(m_a + m_{\mathrm{B}}) - (m_{\mathrm{p}} + m_{{}^{13}_{6}\mathrm{C}})] =$$

$$= c^2[(m({}^{4}_{2}\mathrm{He}) + m({}^{10}_{5}\mathrm{B})) - (m_{\mathrm{H}} + m({}^{13}_{6}\mathrm{C}))],$$

где массы ядер гелия m_a, водорода m_{p}, бора m_{B} и углерода $m_{{}^{13}_{6}\mathrm{C}}$ можно заменить на соответствующие массы атомов гелия $m({}^{4}_{2}\mathrm{He})$, водорода m_{H}, бора $m({}^{10}_{5}\mathrm{B})$ и углерода $m({}^{13}_{6}\mathrm{C})$. Это можно сделать, поскольку суммарное количество электронов в атомах гелия и бора равно суммарному количеству электронов в атомах водорода и изотопа углерода, так что при расчете энергетического выхода реакции учет масс электронов приведет к тому же результату. Определяя по табл. А.1 приложения А массы атомов, находим с точностью до пяти знаков после запятой

$$E = c^2[(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335]\,\text{а. е. м.} =$$

$$= 0,00436 \cdot c^2\ \text{а.е.м.} = 0,00436 \cdot c^2 \cdot 931,5\,\text{МэВ}/c^2 = 4,06\,\text{МэВ}.$$

Ответ: $E = 4,06$ МэВ.

Задача 3. Радиоактивный натрий ${}^{24}_{11}\mathrm{Na}$ распадается с периодом полураспада $T = 14,8$ ч. Вычислить количество атомов, распавшихся в $m = 1$ мг данного радиоактивного препарата за $\Delta t = 10$ ч.

Решение. Число распавшихся ядер радиоактивного натрия за время Δt равно

$$\Delta N = N_0 - N. \qquad (1)$$

где N_0 – число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$;

N – число нераспавшихся радиоактивных ядер натрия в момент времени t.

Согласно закону радиоактивного распада

$$N = N_0 2^{-\Delta t/T}, \qquad (2)$$

число распавшихся ядер радиоактивного натрия за время Δt равно

$$\Delta N = N_0(1 - 2^{-\Delta t/T}). \qquad (3)$$

В 1 моле ${}^{24}_{11}\mathrm{Na}$ содержится число атомов, равное числу Авогадро N_{A}. В данной массе m содержится N_0 атомов, равное произведению числа молей на число Авогадро:

$$N_0 = \frac{m}{m} N_{\mathrm{A}},$$

где m – молярная масса, $m = 24 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Принимая во внимание данное соотношение, из формулы (3) получаем:

$$\Delta N = \frac{m}{m} N_{\mathrm{A}}(1 - 2^{-\Delta t/T}).$$

В полученную формулу подставим числовые значения и вычислим количество атомов ${}^{24}_{11}\mathrm{Na}$, распавшихся в 1 мг данного радиоактивного препарата за 10 ч:

$$\Delta N = \frac{10^{-6} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{24 \cdot 10^{-3}}(1 - 2^{-10/14,8}) = 9,4 \cdot 10^{18}.$$

Ответ: $\Delta N = 9,4 \cdot 10^{18}$.

Задача 4. Карманный дозиметр радиоактивного облучения, представляющий собой миниатюрную ионизационную камеру емкостью 3,0 пФ, заряжен до потенциала 180 В. Под влиянием облучения потенциал снизился до 150 В. Сколько рентген покажет дозиметр, если до этого он был поставлен на нуль, а объем воздуха в камере 1,8 см^3?

Решение. Потенциал дозиметра уменьшился в результате нейтрализации части его заряда ионами, возникшими в камере

при облучении. Величину образовавшегося заряда определим по формуле

$$q = cv = c(\varphi_1 - \varphi_2), \qquad (1)$$

где c – емкость ионизационной камеры;

φ_1, φ_2 – потенциалы до и после облучения, соответственно.

Заряду q соответствует количество пар ионов:

$$N = \frac{q}{q_1}, \qquad (2)$$

где $q_1 = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд одновалентного иона.

Подставим выражение (1) в (2):

$$N = \frac{c(\varphi_1 - \varphi_2)}{e}. \qquad (3)$$

Подставим в выражение (3) числовые значения из условия задачи и получим число пар ионов:

$$N = \frac{3,0 \cdot 10^{-12} \cdot (180 - 150)}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ пар ионов} = 0,562 \cdot 10^9 \text{ пар ионов.}$$

Одному рентгену соответствует доза облучения, при которой в 1 см^3 воздуха образуется 2,082 · 10^9 пар ионов.

Зарегистрированная дозиметром доза облучения равна

$$D = \frac{N}{V \cdot 2,082 \cdot 10^9}, \qquad (4)$$

где V – объем воздуха в камере.

Подставив в выражение (4) числовые значения, получаем:

$$D = \frac{0,562 \cdot 10^9}{1,8 \cdot 2,082 \cdot 10^9} \text{ Р} = 0,150 \text{ Р.}$$

Ответ: D = 0,150 Р.

4. Указания к выполнению и оформлению контрольной работы

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради школьного формата или с помощью ПК в Microsoft Word, шрифт Times New Roman, размер шрифта 12, интервал 1–1,5. Страницы *должны быть пронумерованы и иметь поля* размером 3–3,5 см

для замечаний преподавателя.

На обложке должен быть приклеен *титульный лист* утвержденного образца или аккуратно заполнены все данные титульного листа: шифр, специальность, фамилия, имя, отчество учащегося, предмет и номер работы.

Работа должна быть выполнена *чернилами одного цвета* (за исключением красного), аккуратно и разборчиво.

Каждую задачу следует начинать с новой страницы.

Решение задач желательно располагать в порядке номеров, указанных в задании, номера задач следует указывать перед условием.

Условия задач должны быть полностью переписаны.

Оформляя записи в тетради, необходимо выполнить общие требования к культуре их ведения:

- учащиеся должны соблюдать *абзацы*: всякую новую мысль следует начинать с новой строки;

- *важные формулы, равенства, определения необходимо выделять в отдельные строки*, чтобы сделать их более обозримыми;

- описывая решение задачи, следует отделять краткую запись условия от решения, в конце решения записывается ответ;

- при решении задач желательно использовать *математические символы*, что облегчает записи и проверку.

Решения задач должны сопровождаться *краткими*, но достаточно обоснованными *пояснениями*, используемые формулы нужно выписывать. Вначале задача решается в общем виде, и только после этого в полученный в виде формулы ответ подставляются численные значения величин, заданные в условии.

Чертежи выполняются от руки, аккуратно, в масштабе, допускающем хорошую их наглядность.

В конце работы следует указать *литературу*, которой вы пользовались, проставить *дату* выполнения работы и *подпись*.

Если при проверке будут обнаружены недочеты и ошибки, то учащийся должен выполнить *все указания преподавателя*, сделанные в рецензии.

Контрольные работы должны быть выполнены *в срок*. *В период сессии работы на проверку не принимаются*.

Работа, выполненная не по своему варианту, не учитывается и возвращается учащемуся без оценки.

Учащиеся, *не имеющие зачета* по контрольной работе, *к экзамену не допускаются*.

Во время экзамена зачтенные контрольные работы представляются преподавателю.

5. Контрольная работа 2

Каждая контрольная работа имеет 10 вариантов (табл. 5.1). *Вариант работы* выбирается по последней цифре шифра (номера зачетной книжки). Например, учащиеся, имеющие шифры 25, 117, 300, 204, решают задачи вариантов 5, 7, 0, 4 контрольной работы 2, соответственно.

Таблица 5.1

Вариант	Номер задачи						
0	210	220	230	240	250	260	270
1	211	221	231	241	251	261	271
2	212	222	232	242	252	262	272
3	213	223	233	243	253	263	273
4	214	224	234	244	254	264	274
5	215	225	235	245	255	265	275
6	216	226	236	246	256	266	276
7	217	227	237	247	257	267	277
8	218	228	238	248	258	268	278
9	219	229	239	249	259	269	279

Элементы фотометрии. Геометрическая оптика

Задача 210. Две лампы, сила света которых $I_1 = 75$ кд и $I_2 = 48$ кд, находятся друг от друга на расстоянии $r = 1,8$ м. Где надо поместить между ними экран, чтобы освещенность экрана с двух сторон была одинакова?

Задача 211. На высоте $h = 8,0$ м над землей висит лампа с силой света $I = 1000$ кд. Определите площадь участка, в пределах которого освещенность поверхности не меньше $E = 1,0$ лк.

Задача 212. Определите полный световой поток, создаваемый источником света, помещенным на мачте высоты $h = 12$ м, если на расстоянии $L = 16$ м от основания мачты он создает освещенность $E = 3,0$ лк.

Задача 213. Вогнутое зеркало дает действительное изображение предмета с увеличением $\Gamma_1 = 0,25$. Если предмет переместить на расстояние $a = 5,0$ см ближе к зеркалу, то увеличение станет $\Gamma_2 = 0,50$. Определите фокусное расстояние зеркала.

Задача 214. Рассеивающая линза с фокусным расстоянием $F = 12$ см помещена между двумя точечными источниками света, причем к одному из них в два раза ближе, чем ко второму. Определите расстояние между источниками света, если расстояние между изображениями $L = 7,8$ см.

Задача 215. Луч света падает под углом $a = 30°$ на плоскопараллельную стеклянную $(n = 1,5)$ пластинку и выходит из нее параллельно первоначальному направлению. Определите толщину пластинки, если боковое смещение луча $s = 2,0$ см.

Задача 216. Крайние лучи видимого спектра для оптического стекла «флинт» имеют показатели преломления $n_1 = 1,745$ и $n_2 = 1,809$. Из этого стекла сделана двояковыпуклая линза с радиусами кривизны ее поверхностей $R_1 = R_2 = 20$ см. Определите расстояние между фокусами крайних лучей спектра.

Задача 217. Сечение стеклянной призмы имеет форму равнобедренного треугольника. Одна из равных граней призмы посеребрена. Луч света падает на прозрачную грань призмы перпендикулярно к ее поверхности и после двух отражений выходит через основание призмы, перпендикулярно к нему. Определите углы призмы.

Задача 218. Плоско-выпуклая линза с радиусом кривизны $R = 30$ см дает изображение предмета с линейным увеличением, равным $\Gamma = 2,0$. Найдите расстояние от предмета до линзы и расстояние от линзы до изображения, если показатель преломления стекла, из которого сделана линза, равен $n = 1,5$.

Задача 219. Определите размеры изображения Солнца на пленке фотоаппарата с фокусным расстоянием объектива $F = 50$ мм, если диаметр Солнца $D = 1,4$ млн км, расстояние от Земли до Солнца $r = 150$ млн км.

Волновая оптика

Задача 220. Расстояние между двумя когерентными источниками света $d = 100$ мкм, а ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними интерференционными минимумами) в средней части экрана равна $\Delta y = 10$ мм. Определите расстояние от источников света до экрана, если источники излучают свет с длиной волны $l = 500$ нм.

Задача 221. При наблюдении колец Ньютона в отраженном свете расстояние между 5-м и 25-м светлыми кольцами оказалось равным $d = 9,0$ мм. Определите радиус кривизны линзы, если в опыте используется монохроматическое излучение с длиной волны $l = 680$ нм.

Задача 222. На тонкий стеклянный $(n = 1,5)$ клин нормально к его поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $l = 600$ нм. Определите угол между поверхностями клина, если ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними минимумами) в отраженном свете равна $\Delta y = 4,0$ мм.

Задача 223. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический пучок света ($l = 0,59$ мкм), при этом спектр 3-го порядка наблюдается под углом $j_3 = 10,2°$. При какой длине световой волны дифракционный спектр первого порядка будет наблюдаться под углом $j_1 = 2,8°$?

Задача 224. На щель, ширина которой равна $b = 2,0$ мкм, падает нормально параллельный пучок монохроматического света ($l = 589$ нм). Под какими углами будут наблюдаться три первых дифракционных минимума? Сколько минимумов можно наблюдать в этом опыте?

Задача 225. На дифракционную решетку, имеющую $N = 200$ штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $l = 600$ нм. Определите наибольшее число максимумов, которые можно наблюдать в дифракционном спектре этой решетки.

Задача 226. Параллельный пучок монохроматического света падает нормально на щель, ширина которой равна $b = 2,0$ мкм. Под какими углами будут наблюдаться первый и второй дифракционные максимумы, если длина волны падающего света равна $l = 589$ нм?

Задача 227. Для наблюдения колец Ньютона в отраженном свете (длина волны $l = 550$ нм) плоско-выпуклую линзу с радиусом кривизны $R_1 = 3,0$ м положили на вогнутую линзу с радиусом кривизны $R_2 = 6,0$ м. Определите радиус десятого темного кольца Ньютона.

Задача 228. При каком угле между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора интенсивность естественного света, падающего на поляризатор, уменьшится в $n = 10$ раз?

Задача 229. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности воды, были максимально поляризованы? Показатель преломления воды $n = 1,33$.

Тепловое излучение. Фотоны

Задача 230. Источник монохроматического света мощностью $P = 64$ Вт за промежуток времени $\Delta t = 1$ с испускает $N = 10^{20}$ фотонов, вызывающих фотоэффект на металлической пластинке. Работа выхода электронов из металла $A = 1,6$ эВ. До какого потенциала зарядится пластинка при длительном освещении?

Задача 231. Некоторое тело имеет термодинамическую температуру $T = 522$ К и при этом излучает энергии в $n = 10$ раз больше, чем поглощает. Определите в градусах Цельсия температуру окружающей среды.

Задача 232. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, которые выбиваются из цезия светом с длиной волны $l = 400$ нм, если красная граница фотоэффекта $l_m = 686$ нм.

Задача 233. Лазерное излучение ($l = 0,33$ мкм) используется для нагревания воды, масса которой $m = 1,0$ кг и удельная теплоемкость $c_в = 4,2$ кДж/(кг · К). Сколько времени потребуется для нагревания воды на $\Delta T = 10$ К, если лазер за время $t = 1,0$ с испускает $N = 10^{20}$ фотонов, и все они поглощаются водой?

Задача 234. Электромагнитное излучение со средней интенсивностью $I = 0,1\,\text{Вт/см}^2$ падает под углом $a = 30°$ на идеально отражающую (зеркальную) поверхность. Определите нормальное давление p_n, производимое электромагнитным излучением на эту поверхность.

Задача 235. Фотон с энергией $e = 0,3\,\text{МэВ}$ рассеялся на первоначально покоящемся свободном электроне. Определите кинетическую энергию электрона отдачи, если длина волны рассеянного фотона изменилась на 20 %.

Задача 236. На медный шарик падает монохроматический свет с длиной волны $l = 0,165\,\text{мкм}$. Какой заряд накопится на шарике при его длительном облучении, если работа выхода электронов из меди равна $A = 4,4\,\text{эВ}$? Радиус шарика $R = 3,0\,\text{см}$.

Задача 237. При освещении некоторого металла светом с длиной волны $l = 491\,\text{нм}$ задерживающее напряжение оказалось равным $U_1 = 0,71\,\text{В}$. Когда длину волны падающего света изменили, задерживающее напряжение увеличилось до $U_2 = 1,43\,\text{В}$. Определите длину волны второго источника света и работу выхода электронов из этого металла.

Задача 238. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра (работа выхода $A = 4,7\,\text{эВ}$), при облучении фотонами с длиной волны $l = 1,2\,\text{пм}$.

Задача 239. На зачерненную поверхность площадью $S = 1,0\,\text{см}^2$ за время $\Delta t = 1,0\,\text{с}$ перпендикулярно к ней падает $N = 2,8 \cdot 10^{17}$ фотонов. Определите длину волы падающего излучения, если оно создает на эту поверхность давление $p = 4,6 \cdot 10^{-6}$ Па.

Элементы квантовой и атомной физики

Задача 240. Атом водорода, находящийся в основном состоянии, поглотил фотон с длиной волны $l = 97,3\,\text{нм}$. Определите главное квантовое число и радиус электронной орбиты возбужденного состояния атома.

Задача 241. Определите работу, которую необходимо совершить, чтобы электрон, находящийся в атоме водорода в возбужденном состоянии с главным квантовым числом $n = 2$, удалить за пределы атома.

Задача 242. Определите длину волны де Бройля для электрона, при условии, что его кинетическая энергия равна энергии покоя.

Задача 243. При переходе электронов в атомах водорода с четвертой стационарной орбиты на вторую излучаются фотоны с энергией $e = 2,5\,\text{эВ}$ (зеленая линия водородного спектра). Определите длину волны, соответствующую этой спектральной линии.

Задача 244. Определите дебройлевскую длину волны пули, летящей со скоростью $v = 500$ м/с. Масса пули $m = 10$ г. Объясните полученный результат.

Задача 245. Найдите кинетическую энергию и скорость электронов, находящихся в атоме водорода в состояниях с главным квантовым числом $n = 1$ и $n = 2$.

Задача 246. Протон и электрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов, равную $U = 1,0\,\text{МВ}$. Какая из этих частиц имеет большую длину волны де Бройля и во сколько раз?

Задача 247. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 4,9$ В, сталкивается с атомом ртути и переводит его в первое возбужденное состояние. Какую длину волны имеет фотон, соответствующий переходу атома ртути в нормальное состояние?

Задача 248. Длина волны гамма излучения радия $l = 1,6$ пм. Какую разность потенциалов надо приложить к рентгеновской трубке, чтобы получить рентгеновские лучи с такой длиной волны?

Задача 249. Оцените с помощью соотношения неопределенностей наименьшие ошибки при определении скорости электрона, протона и шарика массы $m = 1$ мг, если координаты частиц и центра шарика установлены с неопределенностью $\Delta x = 1$ мкм.

Основы молекулярной физики

Задача 250. Определите количество вещества и число молекул газа, находящегося в колбе объемом $V = 240\,\text{см}^3$ при темпе-

ратуре $T = 290\,\text{К}$ и давлении $p = 50\,\text{кПа}$.

Задача 251. Атмосфера Солнца (солнечная корона) имеет температуру $T = 2,0 \cdot 10^6\,\text{К}$ и давление $p = 3,0 \cdot 10^{-2}\,\text{Па}$. Определите среднеквадратичную скорость свободных электронов в солнечной короне.

Задача 252. На какой высоте над поверхностью Земли атмосферное давление в 2 раза меньше, чем на ее поверхности? Считать, что температура воздуха $T = 290\,\text{К}$ не изменяется с высотой. Молярная масса воздуха $m = 29\,\text{г/моль}$.

Задача 253. Жилой дом имеет объем комнат $V = 600\,\text{м}^3$. Определите массу воздуха, находящегося внутри дома при температуре $t_1 = 0\,°\text{C}$. Как изменится масса воздуха, если температура в доме повысится до $t_2 = 17\,°\text{C}$?

Задача 254. Определите в джоулях и электронвольтах среднее значение полной кинетической энергии одной молекулы гелия, кислорода и водяного пара при температуре $T = 400\,\text{К}$.

Задача 255. Вода при температуре $t = 4,0\,°\text{C}$ занимает объем $V = 1,0\,\text{см}^3$. Определите количество вещества и число молекул, содержащихся в этом объеме воды.

Задача 256. Мощные насосы позволяют получить вакуум (разреженное состояние газа) с давлением $p = 1,0 \cdot 10^{-12}\,\text{Па}$. Оцените концентрацию частиц идеального газа при таком давлении и температуре $t_0 = 0\,°\text{C}$. На какой высоте над поверхностью Земли давление воздуха при той же температуре будет иметь такое же значение? Нормальное атмосферное давление $p_0 = 100\,\text{кПа}$. Молярная масса воздуха $m = 29\,\text{г/моль}$.

Задача 257. Полная кинетическая энергия молекул многоатомного газа, масса которого $m = 20\,\text{г}$, равна $E_\text{к} = 3,2\,\text{кДж}$. Определите среднюю квадратичную скорость молекул этого газа.

Задача 258. Газ находится при температуре $t_1 = 20\,°\text{C}$ и давлении $p = 0,50\,\text{МПа}$. Какое давление потребуется для того, чтобы увеличить плотность газа в 2 раза, если температура его при этом будет доведена до $t_2 = 80\,°\text{C}$?

Задача 259. В шаре диметром $d = 20\,\text{см}$ находится воздух, масса которого $m = 7,0\,\text{г}$. До какой температуры можно нагреть этот шар, если стенки шара выдерживают максимальное давление $p = 0,80\,\text{МПа}$? Молярная масса воздуха $m = 0,029\,\text{кг/моль}$.

Основы термодинамики

Задача 260. Газовая смесь состоит из азота $(m_1 = 3,0\,\text{кг})$ и водяного пара $(m_2 = 1,0\,\text{кг})$. Определите изохорную c_V и изобарную c_p удельные теплоемкости газовой смеси, считая эти газы идеальными.

Задача 261. При изобарном нагревании кислорода $(p = 80\,\text{кПа})$ объем увеличился от $V_1 = 1,0\,\text{м}^3$ до $V_2 = 3,0\,\text{м}^3$. Определите изменение внутренней энергии газа, работу, совершаемую им при расширении, а также количество теплоты, полученной газом.

Задача 262. После опускания в воду с температурой $t_1 = 10\,°\text{C}$ тела, нагретого до $t_2 = 100\,°\text{C}$, через некоторое время установилась температура $q = 40\,°\text{C}$. Какой станет температура воды, если, не вынимая первого тела, в нее опустить еще одно такое же тело при температуре $t_2 = 100\,°\text{C}$?

Задача 263. Два теплоизолированных сосуда соединены трубкой с закрытым краном. В первом сосуде находится $n_1 = 2\,\text{моль}$ гелия при температуре $T_1 = 200\,\text{К}$, а во втором – $n_2 = 3\,\text{моль}$ гелия при температуре $T_2 = 300\,\text{К}$. Кран открывают. Определите абсолютную температуру в сосудах.

Задача 264. У тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя в 3 раза больше температуры холодильника. Какая работа совершается газом за один цикл, если нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 42\,\text{кДж}$? Чему равен КПД такой тепловой машины?

Задача 265. Два моля идеального газа нагревают на $\Delta T = 10\,\text{К}$ так, что температура газа меняется пропорционально квадрату давления. Определите работу, совершаемую газом при нагревании.

Задача 266. График термодинамического процесса, происходящего в идеальном газе, на диаграмме (V, p) изображается в виде прямой, проходящей через две точки с координатами ($V_1 = 0,010\,\text{м}^3$, $p_1 = 100\,\text{кПа}$) и ($V_2 = 0,015\,\text{м}^3$, $p_2 = 150\,\text{кПа}$). Определите работу газа при изменении объема от $V_1 = 0,010\,\text{м}^3$ до $V_2 = 0,015\,\text{м}^3$.

Задача 267. На какую высоту поднимется бензол в капилляре, внутренний диаметр которого равен $d = 1\,\text{мм}$? Плотность бензола $r = 800\,\text{кг/м}^3$, а коэффициент поверхностного натяжения $s = 0,03\,\text{Н/м}$. Смачивание считать полным.

Задача 268. С какой высоты упал без начальной скорости свинцовый шар, если при падении температура его повысилась на $\Delta T = 5\,\text{К}$? Считать, что 65 % энергии шара пошло на его нагревание. Удельная теплоемкость свинца равна $c = 130\,\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$. Сопротивление воздуха не учитывать.

Задача 269. Тепловой двигатель, рабочим веществом которого является идеальный газ, работает по циклу, состоящему из двух адиабат и двух изохор. Определите КПД такого двигателя, если при адиабатном расширении и адиабатном сжатии температура изменяется в 4 раза.

Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц

Задача 270. Ядро радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ выбросило α-частицу (ядро атома гелия ${}^{4}_{2}\text{He}$). Найдите массовое число и атомный номер вновь образовавшегося ядра. Определите, какому элементу это ядро соответствует.

Задача 271. Определите кинетическую энергию и скорость теплового нейтрона при температуре окружающей среды $t = 27\,°\text{C}$.

Задача 272. Какая масса урана расщепляется в ходе суточной работы атомной электростанции, тепловая мощность которой $P = 1,0\,\text{МВт}$? КПД станции $h = 20\,\%$, дефект массы при делении ядра урана $\Delta m = 4,0\cdot10^{-28}\,\text{кг}$, атомная масса урана $m = 0,238\,\text{кг/моль}$.

Задача 273. Ядро азота ${}^{14}_{7}\text{N}$ захватило α-частицу и испустило протон. Определите массовое число и атомный номер ядра, образовавшегося в результате этого процесса. Какому элементу это ядро соответствует?

Задача 274. Для запуска спутника израсходовано $m = 96\,\text{т}$ топлива с теплотворной способностью $q = 10^7$ Дж/кг. Определите массу урана с молярной массой $m = 235\,\text{г/моль}$, деление которого обеспечило бы запуск спутника. При делении одного ядра урана выделяется энергия, равная $e_0 = 200\,\text{МэВ}$.

Задача 275. Вычислите энергию ядерной реакции ${}^{2}_{1}\text{H} + {}^{2}_{1}\text{H} \to {}^{1}_{1}\text{H} + {}^{3}_{1}\text{H}$.

Задача 276. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные 0,24 МэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определите энергию фотона и соответствующую ему длину волны.

Задача 277. Вычислите энергию ядерной реакции ${}^{7}_{3}\text{Li} + {}^{2}_{1}\text{H} \to {}^{8}_{4}\text{Be} + {}^{1}_{0}\text{n}$.

Задача 278. За время $t = 1,0\,\text{год}$ распадается 60 % исходного количества ядер некоторого радиоактивного элемента. Определите период полураспада этого элемента. За какое время исходное количество ядер этого элемента уменьшится в $n = 10$ раз?

Задача 279. Период полураспада изотопа кобальта ${}^{60}_{27}\text{Co}$ равен $T = 5,3\,\text{года}$. Какая доля первоначального количества ядер этого изотопа распадется за время $t = 5,0\,\text{лет}$?

Рекомендуемая литература

Основная

1. Гурский, И. П. Элементарная физика с примерами решения задач / И. П. Гурский. – М. : Наука, 1984. – 448 с.
2. Зисман, Г. А. Курс общей физики : в 3 т. / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – 6-е изд. – М. : Наука, 1974. – Т. 1 : Механика, молекулярная физика, колебания и волны ; Т. 2 : Электричество и магнетизм ; Т. 3 : Оптика, физика атомов и молекул, физика атомного ядра и микрочастиц.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 5 кн. / И. В. Савельев. – М. : Астрель, 2002–2005. – Кн. 1 : Механика, 2002. – 336 с. ; Кн. 2 : Электричество и магнетизм, 2003. – 336 с. ; Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика, 2004. – 208 с. ; Кн. 4 : Волны. Оптика, 2005. – 256 с. ; Кн. 5 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, 2004. – 368 с.
4. Элементарный учебник физики : в 3 т. / под ред. Г. С. Ландсберга. – 12-е изд. – М. : Физматлит, 2000. – Т. 1 : Механика. Молекулярная физика. – 606 с. ; Т. 2 : Электричество. Магнетизм. – 480 с. ; Т. 3 : Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – 656 с.
5. Яворский, Б. М. Справочное руководство по физике : для поступающих в вузы и для самообразования / Б. М. Яворский, Ю. А. Селезнев. – 4-е изд. – М. : Наука, ФМ, 1989. – 576 с.

Дополнительная

6. Аксенович, Л. А. Физика / Л. А. Аксенович, Н. Н. Ракина. – 2-е изд. – Мн. : Дизайн ПРО, 2000. – 640 с.
7. Болсун, А. И. Физика в экзаменационных задачах / А. И. Болсун, Б. К. Галякевич. – Мн. : БелЭН, 2008.
8. Бондарь, В. Л. Задачи по физике с техническим содержанием / В. Л. Бондарь, Д. И. Кульбицкий, В. А. Яковенко. – Мн. : Нар. асвета, 1986.
9. Волькенштейн, В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, ФМ, 1979. – 352 с.
10. Гольдфарб, Н. И. Сборник вопросов и задач по физике / Н. И. Гольдфарб. – 5-е изд. – М. : Высш. шк., 1987.

11. Жданов, Л. С. Учебник физики для средних специальных заведений / Л. С. Жданов, Г. Л. Жданов. – М. : Наука, 1987.
12. Иродов, И. Е. Волновые процессы. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. : Физматлит : Лаб. базовых знаний ; СПб. : Нев. диалект, 1999. – 256 с.
13. Иродов, И. Е. Задачи по курсу физики / И. Е. Иродов. – М. : Наука, 1985. – 512 с.
14. Иродов, И. Е. Задачи по общей физике / И. Е. Иродов. – М. : Физматлит : Лаб. базовых знаний ; СПб. : Нев. диалект, 2001. – 432 с.
15. Иродов, И. Е. Квантовая физика. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. : Физматлит : Лаб. базовых знаний ; СПб. : Нев. диалект, 2002. – 272 с.
16. Иродов, И. Е. Механика. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. : Физматлит : Лаб. базовых знаний ; СПб. : Нев. диалект, 2000. – 320 с.
17. Иродов, И. Е. Физика макросистем. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. : Физматлит : Лаб. базовых знаний ; СПб. : Нев. диалект, 2001. – 196 с.
18. Иродов, И. Е. Электромагнетизм. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. : Физматлит : Лаб. базовых знаний ; СПб. : Нев. диалект, 2000. – 352 с.
19. Капельян, С. Н. Физика : основные понятия, формулы, законы / С. Н. Капельян, В. А. Малашонок. – Мн. : Аверсэв, 2005. – 96 с.
20. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1982.
21. Савельев И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике / И. В. Савельев. – М. : Наука, ФМ, 1982. – 272 с.
22. Савченко, Н. Е. Основные физические законы и формулы : краткий справочник / Н. Е. Савченко. – Мн. : Выш. шк., 1991.
23. Савченко, Н. Е. Решение задач по физике : справ. пособие / Н. Е. Савченко. – 6-е изд. – Мн. : Выш. шк., 2005. – 479 с.
24. Сборник задач и вопросов по физике : учеб. пособие для средних специальных учеб. заведений / под ред. Р. А. Гладковой. – М. : Наука, 1988.
25. Физика : учеб. пособие / В. А. Бондарь [и др.] ; под. ред.

В. А. Яковенко. – Мн. : БелЭн, 2002. – 512 с.
26. Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – М. : Физматгиз, 1962. – Т. 1 : Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны ; Т. 2 : Электрические и электромагнитные явления ; Т. 3 : Оптика. Атомная физика.
27. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 2-е изд. – М. : Наука, 1985. – 512 с.

Приложение А

(справочное)

Численные значения физических величин

Таблица А.1

Массы покоя некоторых изотопов

Изотоп	Масса
Атом водорода $^{1}_{1}\mathrm{H}$	$m_{\mathrm{H}} = 1{,}00782504$ а. е. м.
Дейтрон (d)	$m_{\mathrm{d}} = 2{,}01354$ а. е. м.
Дейтерий $^{2}_{1}\mathrm{H}\,(\mathrm{D})$	$m_{\mathrm{D}} = 2{,}01410179$ а. е. м.
a-частица (a) (ядро атома гелия)	$m_{a} = 4{,}001488$ а. е. м.
Изотоп гелия $^{4}_{2}\mathrm{He}$	$m(^{4}_{2}\mathrm{He}) = 4{,}00260327$ а. е. м.
Изотоп гелия $^{3}_{2}\mathrm{He}$	$m(^{3}_{2}\mathrm{He}) = 3{,}016977$ а. е. м.
Изотоп лития $^{6}_{3}\mathrm{Li}$	$m(^{6}_{3}\mathrm{Li}) = 6{,}01702$ а. е. м.
Изотоп лития $^{7}_{3}\mathrm{Li}$	$m(^{7}_{3}\mathrm{Li}) = 7{,}01818$ а. е. м.
Изотоп бериллия $^{9}_{4}\mathrm{Be}$	$m(^{9}_{4}\mathrm{Be}) = 9{,}01495$ а. е. м.
Изотоп бериллия $^{10}_{4}\mathrm{Be}$	$m(^{10}_{4}\mathrm{Be}) = 10{,}01611$ а. е. м.
Изотоп бора $^{10}_{5}\mathrm{B}$	$m(^{10}_{5}\mathrm{B}) = 10{,}01294$ а. е. м.
Изотоп бора $^{11}_{5}\mathrm{B}$	$m(^{11}_{5}\mathrm{B}) = 11{,}01280$ а. е. м.
Изотоп углерода $^{12}_{6}\mathrm{C}$	$m(^{12}_{6}\mathrm{C}) = 12{,}00381$ а. е. м.
Изотоп углерода $^{13}_{6}\mathrm{C}$	$m(^{13}_{6}\mathrm{C}) = 13{,}00335$ а. е. м.
Изотоп азота $^{14}_{7}\mathrm{N}$	$m(^{14}_{7}\mathrm{N}) = 14{,}00752$ а. е. м.
Изотоп азота $^{15}_{7}\mathrm{N}$	$m(^{15}_{7}\mathrm{N}) = 15{,}00490$ а. е. м.
Изотоп кислорода $^{16}_{8}\mathrm{O}$	$m(^{16}_{8}\mathrm{O}) = 15{,}9994$ а. е. м.
Изотоп кислорода $^{17}_{8}\mathrm{O}$	$m(^{17}_{8}\mathrm{O}) = 17{,}00452$ а. е. м.
Изотоп кислорода $^{18}_{8}\mathrm{O}$	$m(^{18}_{8}\mathrm{O}) = 18{,}00487$ а. е. м.

Таблица А.2

Фундаментальные физические константы

Физическая константа	Значение
Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11}$ Н · м²/кг²
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,80665$ м/с²
Скорость света в вакууме	$c = 1/\sqrt{e_0 m_0} = 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с
Электрическая постоянная	$e_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м $1/4pe_0 = 9 \cdot 10^9$ Н · м²/Кл²
Магнитная постоянная	$m_0 = 4p \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $= 12,5663706144 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Элементарный заряд	$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Отношение заряда электрона к его массе	$e/m_e = -1,7588047 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Постоянная Планка	$h = 2p\,\mathbf{h} = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж · с $\mathbf{h} = 1,05458866 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380622 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31441$ Дж/(моль · К)
Нормальные условия для идеального газа: объем 1 моля газа нормальное давление нормальная температура	 $V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3}$ м³/моль $P_0 = 101325$ Па; $T_0 = 273,15$ К
Постоянная Фарадея	$F = eN_A = 96,48456 \cdot 10^3$ Кл/моль
Постоянная Стефана–Больцмана	$s = 5,6696 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴)
Постоянные Вина	$b = 2,8978 \cdot 10^{-3}$ м · К $C = 1,30 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³ · К⁵)
Постоянная Ридберга	$R = m_e c^2 a^2 / 2h = 3,289842 \cdot 10^{15}$ Гц $R' = R/c = 1,097373 \cdot 10^7$ м$^{-1}$ $R'' = 2p\,R = 2,0670687 \cdot 10^{16}$ Гц

Окончание табл. А.2

Физическая константа	Значение
Постоянная тонкой структуры	$a = e^2/4pe_0\mathbf{h}c = 7,29729 \cdot 10^{-3}$ $a^{-1} = 137,0371$
Первый боровский радиус	$r_0 = \dfrac{4pe_0\mathbf{h}^2}{m_e e^2} = 5,29173 \cdot 10^{-11}$ м
Комптоновская длина волны электрона	$l_e = h/m_e c = 2,42627 \cdot 10^{-12}$ м $\mathbf{D}_e = \mathbf{h}/m_e c = 3,86153 \cdot 10^{-13}$ м
Энергия ионизации атома водорода	$E_H = 13,527$ эВ $= 2,16728 \cdot 10^{-18}$ Дж

Таблица А.3

Единицы массы и энергии и массы покоя некоторых элементарных частиц

Параметр	Значение
Атомная единица массы	1а.е.м. $= \dfrac{1}{12} M_{C^{12}} = 1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 931,5037$ МэВ/с² 1кг $= 5,6095 \cdot 10^{35}$ эВ/с² $= 6,022045 \cdot 10^{26}$ а. е. м.
Единицы энергии	1эВ $= 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Дж = $= c^2 \cdot 17,8268767 \cdot 10^{-37}$ кг
Электрон (e^-) Позитрон (e^+)	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг $= 5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а. е. м. $m_e c^2 = 0,511$ МэВ $= 8,187241 \cdot 10^{-16}$ Дж
Мю-мезон ($\mu^\pm$)	$m_\mu = 206,769\, m_e = 1,88357 \cdot 10^{-28}$ кг $m_\mu c^2 = 105,659$ МэВ
Протон (p) (ядро атома водорода)	$m_p = 1836,15155\, m_e = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,007276470$ а. е. м. $m_p c^2 = 938,28$ МэВ
Нейтрон (n)	$m_n = 1837,57138\, m_e = 1,6739419 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,008665012$ а. е. м. $m_n c^2 = 938,999$ МэВ

Таблица А.4

Термодинамические характеристики некоторых веществ

Вещество	Плотность r, кг/м^3	Удельная теплоемкость c, Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления (кристаллизации) λ, кДж/кг	Удельная теплота парообразования (конденсации) L, МДж/кг
Алюминий	2700	896	397	10,9
Анилин	1020	2170	–	40,7
Вода	1000	4190	333,7	2,256
Водяной пар	880 (100°)	–	–	–
Воздух	1293	–	–	–
Железо	7800	465	277	6,34
Латунь	8400–8700	385	–	–
Лед	916	2090	330	–
Медь	8900	385	205	4,79
Олово	7400	218	59,6	2,45
Свинец	11300	130	23	8,6
Серебро	10500	234	104,5	–
Эфир	720	2350	–	0,37

Таблица А.5

Работа выхода электронов

Вещество	A, Дж	A, эВ	Вещество	A, Дж	A, эВ
Алюминий	$5,98\cdot10^{-19}$	3,74	Медь	$7,15\cdot10^{-19}$	4,40
Барий	$3,66\cdot10^{-19}$	2,29	Молибден	$6,83\cdot10^{-19}$	4,27
Висмут	$7,39\cdot10^{-19}$	4,62	Натрий	$3,63\cdot10^{-19}$	2,27
Вольфрам	$7,20\cdot10^{-19}$	4,54	Никель	$7,74\cdot10^{-19}$	4,50
Железо	$6,98\cdot10^{-19}$	4,31	Платина	$8,46\cdot10^{-19}$	5,29
Золото	$7,33\cdot10^{-19}$	4,30	Рубидий	$3,34\cdot10^{-19}$	2,09
Калий	$3,44\cdot10^{-19}$	2,22	Серебро	$7,85\cdot10^{-19}$	4,28
Кобальт	$6,80\cdot10^{-19}$	4,41	Цезий	$3,02\cdot10^{-19}$	1,81
Литий	$3,82\cdot10^{-19}$	2,38	Цинк	$5,98\cdot10^{-19}$	3,74

Содержание

Предисловие 3

1. Учебная программа 3
1.1. Примерный тематический план 3
1.2. Содержание предмета 5

2. Вопросы для самоконтроля 8

3. Основные формулы и примеры решения задач 13

4. Указания к выполнению и оформлению контрольной работы 70

5. Контрольная работа 2 72

Рекомендуемая литература 82

Приложение А. Численные значения физических величин . . . 85

www.reshuzadachi.ru сайт контрольных работ

Учебное издание

Ф И З И К А

Учебная программа, методические указания
и контрольные задания
для учащихся безотрывной формы обучения специальностей
2-25 01 10 «Коммерческая деятельность»,
2-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств», 2-39 02 31 «Техническая эксплуатация радиоэлектронных средств», 2-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий», 2-40 02 02 «Электронные вычислительные средства»

В двух частях

ЧАСТЬ 2
ОПТИКА. КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА. ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Составители:
Тараканов Александр Николаевич
Болсун Александр Иванович
Сологуб Людмила Владимировна

Зав. ред.-издат. отд. О. П. Козельская
Редактор Г. Л. Говор
Корректор Н. Г. Михайлова
Компьютерная верстка А. П. Пучек

План издания 2008 г. (поз. 9)

Изд. лиц. № 02330/0131735 от 17.02.2004.
Подписано в печать 09.07.2008. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$.
Бумага писчая. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 5,23. Уч.-изд. л. 4,61. Тираж 140 экз. Заказ 140.

Издатель и полиграфическое исполнение Учреждение образования
«Минский государственный высший радиотехнический колледж»
220005, г. Минск, пр-т Независимости, 62.

ISBN 978-985-6851-56-1