

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**Н.А. Очкина, З.А. Сидякина, Т.С. Шмарова**

# **ФИЗИКА. ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

## **ПРАКТИКУМ**

Рекомендовано Редсоветом университета в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям 21.03.02 «Землеустройство и кадастры», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 09.03.02 «Информационные системы и технологии», 35.03.02 «Технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств», 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 20.03.01 «Техносферная безопасность»

Под общей ред. доктора технических наук,  
профессора Г.И. Грейсуха

Пенза 2015

УДК 535+530.145(075.8)

ББК 22.34+22.314я73

О-95

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент  
С.В. Тертычная (ПГУ);  
кандидат физико-математических  
наук, доцент П.П. Мельниченко  
(ПГУАС)

**Очкина Н.А.**

Физика. Оптика. Квантовая физика. Практикум: учеб. пособие /  
О-95 Н.А. Очкина, З.А. Сидякина, Т.С. Шмарова; под общ. ред.  
Г.И. Грейсуха. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 88 с.

Содержит теорию и формулы, необходимые для решения задач, по следующим разделам курса физики: «Волновая оптика», «Квантовая оптика», «Квантовая механика»; примеры решения задач, варианты контрольных работ для самостоятельного решения и необходимые справочные данные.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Физика и химия» и предназначено для самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлениям 21.03.02 «Землеустройство и кадастры», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 09.03.02 «Информационные системы и технологии», 35.03.02 «Технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств», 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 20.03.01 «Техносферная безопасность».

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2015

© Очкина Н.А., Сидякина З.А.,  
Шмарова Т.С., 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие составлено в соответствии с программой курса «Физика» Федерального Государственного стандарта высшего и профессионального образования для направлений подготовки бакалавров 21.03.02 «Землеустройство и кадастры», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 09.03.02 «Информационные системы и технологии», 35.03.02 «Технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств», 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Пособие содержит три раздела:

- 1) волновая оптика;
- 2) квантовая оптика;
- 3) квантовая механика.

Каждый раздел начинается с краткого изложения теоретического материала по теме, перечня основных обозначений, используемых формул и физических законов. Далее для лучшего усвоения материала даны типичные для данного раздела задачи, подробно разобранные, и задачи для самостоятельного решения. Предлагаемые для самостоятельного решения задачи могут служить материалом для семестровых заданий по усмотрению преподавателя.

В конце пособия имеются приложения, содержащие необходимые справочные сведения.

Пособие содержит весь необходимый для самостоятельного решения задач теоретический материал; таким образом, не потребуется использование дополнительных литературных источников при решении задач из раздела самостоятельных заданий данного пособия, что способствует более рациональному использованию времени, отводимому студентам для самостоятельной работы.

## ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа является одной из важнейших составляющих образовательного процесса. Цель самостоятельной работы студентов:

- ✓ систематическое изучение дисциплин в течение семестра;
- ✓ закрепление и углубление полученных знаний и навыков;
- ✓ подготовка к предстоящим занятиям;
- ✓ формирование культуры умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний и умений;
- ✓ формирование необходимых компетенций.

Правильно спланированная, организованная и контролируемая аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа студентов имеет огромное образовательное и воспитательное значение. Она является условием для достижения высоких результатов обучения и превращает полученные знания в устойчивые умения и навыки. В связи с тем, что в рабочих программах на самостоятельную работу студентов отводится нередко такое же количество часов, как и на аудиторные занятия, появляется необходимость организации плодотворной самостоятельной работы студентов. Данное пособие позволяет решить эту задачу.

Основное назначение пособия – показать каждому студенту возможность перехода от деятельности, выполняемой под руководством преподавателя, к деятельности, организуемой самостоятельно.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. На титульном листе указывается номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилия и инициалы студента, группа.
2. Каждая задача оформляется на отдельном листе.
3. Условия задач студенты переписывают полностью без сокращений.
4. Далее необходима также краткая запись данных. Все значения величин, заданных в условиях и привлекаемых из справочных таблиц, записывают в тех единицах, которые заданы, и в единицах СИ.
5. Все задачи следует решать в международной системе единиц (СИ).
6. Чертежи, если они требуются при решении задачи, следует выполнять аккуратно при помощи чертежных инструментов; объяснение решения должно быть согласовано с обозначениями на чертежах.
7. Необходимо указать физические законы, которые должны быть использованы, и аргументировать возможность их применения для решения данной задачи.
8. С помощью этих законов, учитывая условия задачи, получить необходимые расчетные формулы.
9. Вывод формул и решение задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями.
10. Используемые в формулах буквенные обозначения должны быть согласованы с обозначениями, приведенными в условии задачи и на рисунке. Дополнительные буквенные обозначения следует сопровождать соответствующими объяснениями.
11. Получив расчетную формулу, необходимо проверить ее размерность.
12. После проверки размерности полученных расчетных формул приводится численное решение задачи.
13. В конце записывается ответ.

# 1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

**Волновая оптика** – раздел оптики, объясняющий оптические явления на основе волновой природы света. Волновая оптика описывает такие оптические явления, как интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия.

**Интерференцией** называется явление усиления волн в одних точках пространства и ослабление их в других в результате наложения двух или нескольких световых волн.

Абсолютный показатель преломления среды

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;

$v$  – скорость света в среде.

Оптическая длина пути световой волны

$$L = nS, \quad (1.2)$$

где  $n$  – показатель преломления;

$S$  – геометрическая длина пути.

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1; \quad (1.3)$$

$$L_2 = n_2 l_2; \quad L_1 = n_1 l_1.$$

Разность фаз колебаний  $\Delta\varphi$  связана с оптической разностью хода волн соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \quad (1.4)$$

где  $\Delta\varphi$  – разность фаз колебаний;

$\Delta$  – оптическая разность хода волн;

$\lambda$  – длина волны.

**Интерференционная картина** представляет собой набор чередующихся полос с максимальной и минимальной освещенностью.

Условие максимума интенсивности света при интерференции

$$\Delta = \pm k\lambda, \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (1.5)$$

**Интерференционные максимумы** наблюдаются в точках пространства, для которых оптическая разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн или четному числу длин полуволн.

Условие минимума интенсивности света при интерференции

$$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (1.6)$$

**Интерференционные минимумы** наблюдаются в точках пространства, для которых оптическая разность хода интерферирующих волн равна нечётному числу длин полуволн.

### Способы получения интерференционной картины

#### Опыт Юнга

Очень малый источник монохроматического света  $S$  (рис.1.1) освещает два столь же малых и близко расположенных друг от друга отверстия  $S_1$  и  $S_2$  в экране  $B$ .

По принципу Гюйгенса эти отверстия можно рассматривать как самостоятельные источники вторичных сферических волн. Если точки  $S_1$  и  $S_2$  расположены на одинаковых расстояниях от источника света  $S$ , то фазы колебаний в этих точках будут одинаковы (волны когерентны), а в какой-либо точке  $P$  второго экрана  $\mathcal{E}$ , куда будут приходить световые волны от  $S_1$  и  $S_2$ , разность фаз накладывающихся друг на друга колебаний будет зависеть от разности  $S_1P - S_2P$ . Таким образом, в области перекрытия световых пучков наблюдается устойчивая интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

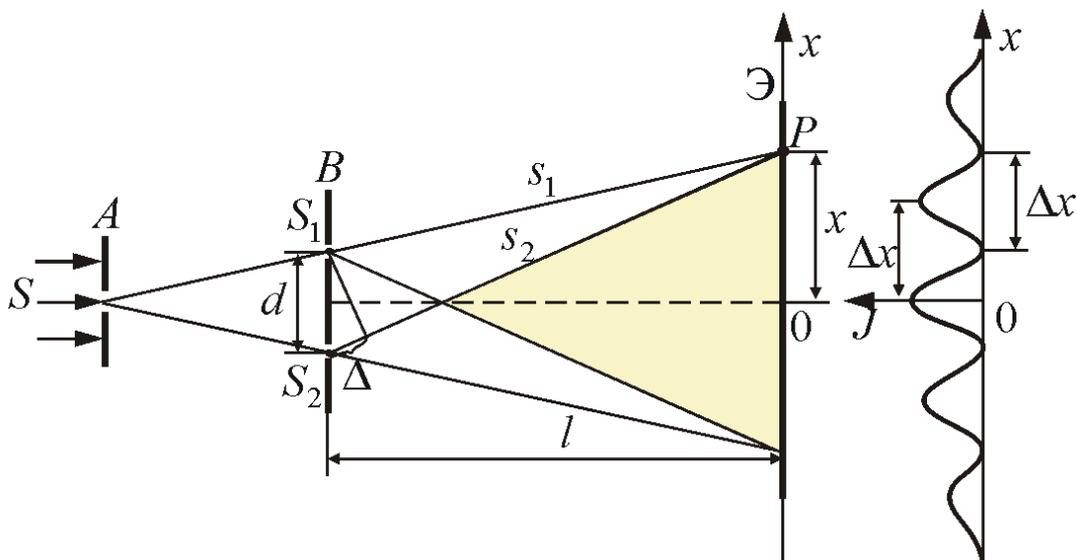


Рис. 1.1

Оптическая разность хода лучей в опыте Юнга определяется по формуле

$$\Delta = \frac{xd}{\ell}, \quad (1.7)$$

где  $d$  – расстояние между щелями на экране;

$\ell$  – расстояние от экрана с щелями до экрана, на котором получается интерференционная картина;

$x$  – координата рассматриваемой точки экрана.

Расстояние  $x_k$  до точек экрана, в которых наблюдаются интерференционные максимумы,

$$x_k = \frac{k\lambda\ell}{d}. \quad (1.8)$$

Расстояние  $x_k$  до точек экрана, в которых наблюдаются интерференционные минимумы,

$$x_k = \frac{(2k+1)\lambda\ell}{2d}. \quad (1.9)$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

$$\Delta x = \frac{\ell}{d}\lambda. \quad (1.10)$$

### **Интерференция в тонких плоскопараллельных пластинках или пленках**

При освещении тонкой пленки происходит наложение волн от одного и того же источника, отразившихся от передней и задней поверхностей пленки. При этом может возникнуть интерференция света. Если свет белый, то интерференционные полосы окрашены. Интерференцию в пленках можно наблюдать на стенках мыльных пузырей, на тонких пленках масла или нефти, плавающих на поверхности воды, на пленках, возникающих на поверхности металлов или зеркала.

Оптическая разность хода интерферирующих волн в проходящем свете определяется по формуле

$$\Delta = 2dn \cos r \text{ или } \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}, \quad (1.11)$$

где  $d$  – толщина пленки;

$n$  – показатель преломления вещества пленки;

$r$  – угол преломления;

$i$  – угол падения.

Если интерференция наблюдается в отраженном свете, то для определения оптической разности хода надо учесть изменение разности хода лучей на  $\frac{\lambda}{2}$  при отражении света от более плотной среды. Формула разности хода в этом случае имеет вид

$$\Delta = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2} \text{ или } \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}. \quad (1.12)$$

### Кольца Ньютона

Интерференционная картина в виде концентрических колец (колец Ньютона) наблюдается при отражении света от соприкасающихся друг с другом плоскопараллельной стеклянной пластинки и плоско-выпуклой линзы с большим радиусом кривизны. Роль тонкой пленки, от поверхности которой отражаются волны, играет воздушный зазор между пластинкой и линзой (вследствие большой толщины пластинки и линзы за счет отражений от других поверхностей интерференционные полосы не возникают). При нормальном падении света полосы равной толщины имеют вид окружностей, при наклонном – эллипсов.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете определяются по формуле

$$r_m = \sqrt{(2m-1)\frac{\lambda}{2}R}, \quad (1.13)$$

где  $m$  – номер кольца;

$R$  – радиус кривизны поверхности линзы, соприкасающейся с плоскопараллельной стеклянной пластиной.

Радиусы темных колец в отраженном свете определяются по формуле

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}. \quad (1.14)$$

В проходящем свете расположение светлых и темных полос обратно их расположению в отраженном свете.

**Дифракция света** – явление огибания световыми волнами непрозрачных тел и захождения волн в область геометрической тени, обусловленные интерференционным перераспределением световой энергии.

### Дифракция на прямоугольной щели

Условие минимальной интенсивности при дифракции на прямоугольной щели имеет вид

$$a \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (1.15)$$

где  $a$  – ширина щели;

$\varphi$  – угол отклонения луча от своего первоначального распространения;

$k$  – порядковый номер дифракционного минимума ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

Условие максимумов описывается выражением

$$a \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (1.16)$$

### Дифракционная решетка

Дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которой остро отточенным алмазным резцом нанесен ряд параллельных штрихов одинаковой ширины  $b$  на равных расстояниях  $a$  друг от друга.

Сумма  $a + b = d$  называется периодом или постоянной дифракционной решетки.

Период дифракционной решетки может быть найден по следующей формуле:

$$d = \frac{L}{N}, \quad (1.17)$$

где  $L$  – ширина решетки;

$N$  – число штрихов, нанесенных на решетку.

Если известно число штрихов  $N$ , приходящихся на 1 мм решётки, то период решётки находят по формуле

$$d = \frac{1}{N}. \quad (1.18)$$

Условие максимума дифракционной решетки имеет вид

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (1.19)$$

где  $\varphi$  – угол отклонения луча от своего первоначального распространения;

$k$  – порядковый номер максимума дифракционной решетки ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

**Поляризацией света** называется выделение линейно поляризованного света из естественного или частично поляризованного.

### **Поляризация при отражении и преломлении света на границе двух диэлектриков**

Опыт показывает, что при отражении естественного светового луча от границы раздела двух диэлектрических сред (в частном случае вакуум – диэлектрик), отраженный луч оказывается частично поляризованным. Степень поляризации отраженного света зависит от угла падения луча  $i$  и относительного показателя преломления сред  $n_{21}$ .

Плоская поляризация отраженного света будет полной, если выполняется следующее соотношение, которое носит название закона Брюстера:

$$\operatorname{tg}(i_{\text{Б}}) = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.20)$$

где  $i_{\text{Б}}$  – угол падения луча на границу раздела двух сред;

$n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления этих двух сред;

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

Угол  $i_{\text{Б}}$ , определяемый этим выражением, называется углом полной поляризации, или углом Брюстера. При падении естественного луча под углом полной поляризации отраженный луч полностью поляризован.

### **Закон Малюса**

Существуют различные оптические устройства, с помощью которых неполяризованный свет можно превратить в поляризованный (например, кристалл турмалина). Таким же свойством обладают так называемые поляроиды. Поляроид представляет собой тонкую пленку кристаллов гепатита. После прохождения неполяризованного света через поляроид свет становится линейно поляризованным. Направление колебаний электрического вектора в прошедшей волне называют разрешенным направлением поляроида.

Поляроиды применяются для получения поляризованного света и его анализа (поляризаторы и анализаторы).

Интенсивность света  $I_0$ , прошедшего через поляризатор, определяется формулой

$$I_0 = \frac{I_{\text{ест}}}{2}, \quad (1.21)$$

где  $I_{\text{ест}}$  – интенсивность естественного света.

Чтобы убедиться в том, что свет поляризован, и определить направление поляризации, используют второй поляризатор, который помещают после первого поляризатора. Вторым поляризатор в этом случае называют анализатором.

Тогда справедливо следующее соотношение, которое называется законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (1.22)$$

где  $I_0$  – интенсивность света, падающего на поляризатор и анализатор;

$I$  – интенсивность света, прошедшего через анализатор;

$\alpha$  – угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

Степень поляризации

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.23)$$

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

Угол вращения плоскости поляризации в сахарном растворе

$$\varphi = \alpha c l, \quad (1.24)$$

где  $\varphi$  – угол поворота плоскости поляризации;

$c$  – концентрация сахарного раствора;

$l$  – длина трубки с раствором;

$\alpha$  – удельная постоянная вращения сахарного раствора.

## Примеры решения задач

1. На пленку ( $n_2 = 1,4$ ) под углом  $i = 52^\circ$  падает белый свет. При какой толщине пленка в проходящем свете будет казаться красной? Длина волны красного света  $\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7}$  м.

Дано:

$$n_2 = 1,4$$

$$i = 52^\circ$$

$$\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

---


$$d - ?$$

Решение:

Используем формулу оптической разности хода лучей в пленке в проходящем свете

$$\Delta = 2d \sqrt{n_2^2 - \sin^2 i}.$$

Условием максимума, т.е. условием того, что пленка будет казаться окрашенной, является выражение

$$\Delta = k\lambda.$$

Приравняв правые части этих равенств и выразив толщину пленки, получаем следующее выражение:

$$d = \frac{k\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - \sin^2 i}}.$$

Для минимальной толщины пленки  $k = 1$ , так что

$$d = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - \sin^2 i}}.$$

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$d = \frac{6,7 \cdot 10^{-7}}{2\sqrt{1,4^2 - \sin^2 52^\circ}} = 2,89 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ:  $2,89 \cdot 10^{-7}$  м.

2. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает свет с длиной волны 550 нм. Период решетки 4,58 мкм. Определите общее число максимумов, даваемых решеткой, и угол дифракции, соответствующий последнему максимуму.

<p>Дано:  <math>\lambda = 550 \text{ нм}</math>  <math>d = 4,58 \text{ мкм}</math></p> <hr/> <p><math>N - ?</math>  <math>\varphi_{\max} - ?</math></p>	<p>СИ  <math>550 \cdot 10^{-9} \text{ м}</math>  <math>4,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}</math></p>	<p>Решение:</p> <p>Поскольку наибольший угол отклонения лучей решетки не может быть более <math>90^\circ</math>, из условия дифракционного максимума для дифракционной решетки можно найти <math>k_{\max}</math></p> $k_{\max} \leq \frac{d \sin 90^\circ}{\lambda} \leq \frac{d}{\lambda} \leq \frac{4,58 \cdot 10^{-6}}{550 \cdot 10^{-9}} \leq 8,31 = 8,$ <p>где <math>k_{\max} = 8</math>, так как число <math>k</math> должно быть целым.</p>
---	--	--

Общее число максимумов, даваемых дифракционной решеткой,

$$N = 2k_{\max} + 1,$$

так как максимумы наблюдаются как справа, так и слева от центрального максимума (единица учитывает центральный максимум).

$$N = 2 \cdot 8 + 1 = 17.$$

Угол дифракции, соответствующий последнему максимуму, найдем, записав условие дифракционного максимума для решетки в виде:

$$d \sin \varphi_{\max} = k_{\max} \cdot \lambda.$$

Откуда

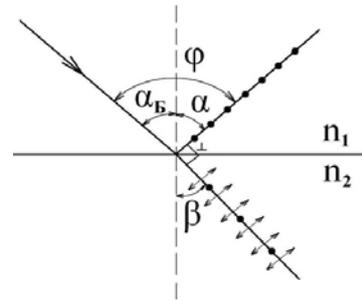
$$\varphi_{\max} = \arcsin \frac{k_{\max} \cdot \lambda}{d}.$$

Подставляя численные значения, получим

$$\varphi_{\max} = \arcsin \frac{8 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{4,58 \cdot 10^{-6}} = 73,9^\circ.$$

Ответ:  $N = 17$ ;  $\varphi_{\max} = 73,9^\circ$ .

3. Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины луч повернут на угол  $\varphi = 97^\circ$  по отношению к падающему лучу. Определите показатель преломления жидкости, если отраженный свет максимально поляризован (см. рисунок).



Дано:

$$\varphi = 97^\circ$$

$$\alpha = \alpha_B$$

$$n_2 = 1,5 \text{ (стекло)}$$

$$n_1 = ?$$

Решение:

Согласно закону Брюстера луч света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован в том случае, если

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}.$$

Согласно условию задачи отраженный луч повернут на угол  $\varphi$  относительно падающего луча. Так как угол падения равен углу отражения, то

$$\alpha_B = \frac{\varphi}{2}.$$

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

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$n_1 = \frac{1,5}{\operatorname{tg} \frac{97^\circ}{2}} = \frac{1,5}{1,13} = 1,33.$$

Ответ: 1,33.

### Задачи для самостоятельного решения

**1.1.** Чему равна оптическая разность хода двух лучей в воде, если геометрическая разность хода равна 5 см?

**1.2.** При какой разности хода возникает максимум второго порядка при интерференции когерентных лучей с длиной волны 400 нм?

**1.3.** Разность хода двух интерферирующих лучей равна  $\frac{\lambda}{4}$ . Чему равна разность фаз колебаний?

**1.4.** Разность хода двух интерферирующих лучей равна  $\frac{\lambda}{6}$ . Чему равна разность фаз колебаний?

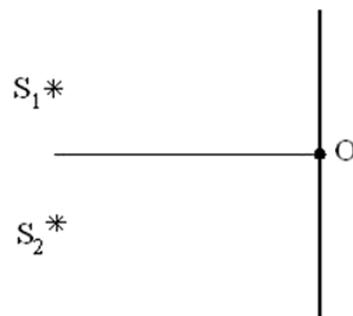
**1.5.** Разность фаз колебаний двух интерферирующих лучей равна  $90^\circ$ . Чему равна разность хода волн?

**1.6.** Разность фаз колебаний двух интерферирующих лучей равна  $60^\circ$ . Чему равна разность хода волн?

**1.7.** В некоторую точку пространства приходит излучение с оптической разностью хода волн 1,8 мкм. Определите, усилится или ослабнет свет в этой точке, если длина волны 600 нм.

**1.8.** Оптическая разность хода лучей от двух когерентных источников в некоторой точке равна 1,2 мкм. Длина волны в вакууме 480 нм. Что будет наблюдаться в данной точке: максимум или минимум освещенности?

**1.9.**  $S_1$  и  $S_2$  – источники когерентных волн (см. рисунок). Чему будет равна разность фаз колебаний, возбуждаемых этими волнами в т.О (центральный максимум)?



**1.10.** При какой наименьшей (отличной от нуля) разности хода волн при интерференции двух когерентных волн с длиной волны 2 мкм наблюдается интерференционный максимум?

**1.11.** При какой разности хода возникает максимум третьего порядка при интерференции когерентных лучей с длиной волны 300 нм?

**1.12.** При какой разности хода возникает минимум второго порядка при интерференции когерентных лучей с длиной волны 600 нм?

**1.13.** Максимум какого порядка возникает при интерференции когерентных лучей с длиной волны 400 нм при разности хода 1,6 мкм?

**1.14.** Две когерентные световые волны приходят в некоторую точку пространства с разностью хода 2,25 мкм. Каков результат интерференции в этой точке, если свет красный (750 нм)?

**1.15.** Две когерентные световые волны приходят в некоторую точку пространства с разностью хода 2,25 мкм. Каков результат интерференции в этой точке, если свет зеленый (500 нм)?

**1.16** Найдите все длины волн видимого света (от 0,40 до 0,75 мкм), которые будут максимально усилены при оптической разности хода интерферирующих волн, равной 1,8 мкм.

**1.17.** Найдите все длины волн видимого света (от 0,40 до 0,75 мкм), которые будут максимально ослаблены при оптической разности хода интерферирующих волн, равной 1,8 мкм.

**1.18.** Расстояние между двумя когерентными источниками света ( $\lambda=0,5$  мкм) равно 0,1 мм. Расстояние между интерференционными полосами на экране в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определите расстояние от источников до экрана.

**1.19.** Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр ( $\lambda_1 = 500$  нм) заменить красным ( $\lambda_2 = 650$  нм)?

**1.20.** В опыте Юнга расстояние между щелями равно 0,8 мм. На каком расстоянии от щелей надо поместить экран, чтобы ширина интерференционной полосы была равна 2 мм?

**1.21.** В опыте Юнга расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определите угловое расстояние между соседними светлыми полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на расстоянии 4,5 мм.

**1.22.** В опыте Юнга расстояние между щелями равно 1 мм, а расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определите положение первой светлой полосы, если щели осветить светом с длиной волны 0,5 мкм.

**1.23.** Расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга равно 1 м. Определите расстояние между щелями, если на отрезке длиной 1 см укладывается 10 темных интерференционных полос. Длина волны 0,7 мкм.

**1.24.** При наблюдении интерференции фиолетового света в опыте Юнга расстояние между соседними темными полосами на экране равно 2 мм. Каким станет это расстояние, если источник фиолетового света заменить источником красного света, длина волны которого в 1,5 раза больше?

**1.25.** В опыте Юнга расстояние между щелями равно 0,8 мм. На каком расстоянии от щелей следует расположить экран, чтобы ширина интерференционной полосы оказалась равной 2 мм?

**1.26.** Радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 2 мм. Определите радиус кривизны линзы, если длина волны 500 нм.

**1.27.** Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона в отраженном свете равно 9 мм. Радиус кривизны линзы 15 м. Определите длину волны света, падающего на установку.

**1.28.** Кольца Ньютона образуются между плоским стеклом и линзой с радиусом кривизны 10 м. Монохроматический свет падает нормально. Диаметр третьего светлого кольца в отраженном свете равен 8 мм. Найдите длину волны падающего света.

**1.29.** Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. Длина волны света 0,5 мкм. Найдите радиус кривизны линзы, если диаметр четвертого темного кольца в отраженном свете равен 8 мм.

**1.30.** Найдите радиус центрального темного пятна колец Ньютона, если между линзой и пластинкой налит бензол ( $n=1,5$ ). Радиус кривизны линзы 1 м. Показатели преломления линзы и пластинки одинаковы. Наблюдение ведется в отраженном свете ( $\lambda=589$  нм).

**1.31.** Плоско-выпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны сферической поверхности 12,5 см прижата к стеклянной пластинке. Диаметры десятого и пятнадцатого темных колец Ньютона в отраженном свете равны 1 мм и 1,5 мм соответственно. Определите длину волны света.

**1.32.** Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плоско-выпуклой стеклянной линзой налита жидкость, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла. Радиус восьмого темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете ( $\lambda=700$  нм) равен 2 мм. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы равен 1 м. Найдите показатель преломления жидкости.

**1.33.** Найдите расстояние между двадцатым и двадцать первым светлыми кольцами Ньютона, если расстояние между вторым и третьим равно 1 мм, а кольца наблюдаются в отраженном свете.

**1.34.** Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдение ведется в отраженном свете. Расстояние между вторым и двадцатым темными кольцами 4,8 мм. Найдите расстояние между третьим и шестнадцатым темными кольцами Ньютона.

**1.35.** Найдите расстояние между десятым и двадцатым светлыми кольцами Ньютона, если расстояние между вторым и третьим равно 1 мм, а кольца наблюдаются в проходящем свете.

**1.36.** Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдение ведется в проходящем свете. Расстояние между третьим и десятым темными кольцами 4,5 мм. Найдите расстояние между вторым и шестнадцатым темными кольцами Ньютона.

**1.37.** При наблюдении колец Ньютона в отраженном синем свете ( $\lambda=450$  нм) с помощью плоско-выпуклой линзы, положенной на плоскую пластинку, радиус третьего светлого кольца оказался равным 1,06 мм. После замены синего светофильтра на красный был измерен радиус пятого светлого кольца, оказавшийся равным 1,77 мм. Найдите радиус кривизны линзы и длину волны красного света.

**1.38.** Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы 5 м. Наблюдение ведется в проходящем свете. Найдите радиусы

четвертого синего кольца ( $\lambda_C=400$  нм) и третьего красного кольца ( $\lambda_{KP}=630$  нм).

**1.39.** Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы 15 м. Наблюдение ведется в отраженном свете. Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона 9 мм. Найдите длину волны монохроматического света.

**1.40.** Мыльный пузырь имеет зеленую окраску ( $\lambda=540$  нм) в области точки, ближайшей к наблюдателю. Если показатель преломления мыльной воды 1,35, то какова минимальная толщина пузыря в указанной области?

**1.41.** На мыльную пленку падает белый свет под углом  $45^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в зеленый цвет ( $\lambda=0,54$  мкм)? Показатель преломления мыльной воды 1,33.

**1.42.** На пленку из глицерина толщиной 0,25 мкм падает белый свет. Каким будет казаться цвет пленки в отраженном свете, если угол падения лучей равен  $60^\circ$ ?

**1.43.** На мыльную пленку, находящуюся в вакууме, нормально падает пучок белого света. При какой наименьшей толщине пленки отраженный свет с длиной волны 0,45 мкм будет максимально ослаблен в результате интерференции?

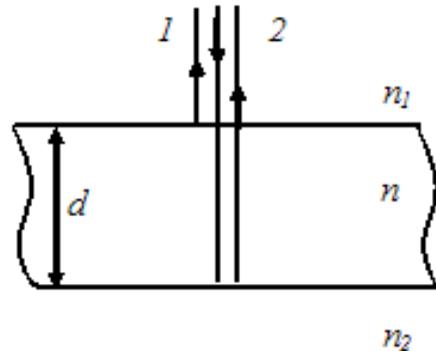
**1.44.** На пленку из глицерина толщиной 0,15 мкм падает белый свет. Каким будет казаться цвет пленки в отраженном свете, если угол падения лучей равен  $30^\circ$ ?

**1.45.** Темной или светлой будет в отраженном свете мыльная пленка толщиной  $d=0,1\lambda$ ? Пленка находится в воздухе.

**1.46.** При каких толщинах пленки исчезают интерференционные полосы при освещении ее светом с длиной волны  $\lambda=6\cdot 10^{-5}$  см? Показатель преломления пленки  $n=1,5$ .

**1.47.** На мыльную пленку, находящуюся в вакууме, нормально падает пучок белого света. При какой наименьшей толщине пленки отраженный свет с длиной волны 0,55 мкм будет максимально ослаблен в результате интерференции?

**1.48.** Тонкая стеклянная пластинка с показателем преломления  $n=1,5$  и толщиной  $d = 2$  мкм помещена между двумя средами с показателями преломления  $n_1=1,2$  и  $n_2=1,6$ . На пластинку по нормали падает свет с длиной волны  $\lambda=600$  нм. Чему равна разность хода интерферирующих отраженных лучей?



**1.49.** Найдите минимальную толщину пленки с показателем преломления 1,33, при которой свет с длиной волны 0,64 мкм испытывает максимальное отражение, а свет с длиной волны 0,40 мкм не отражается совсем. Угол падения света равен  $30^\circ$ .

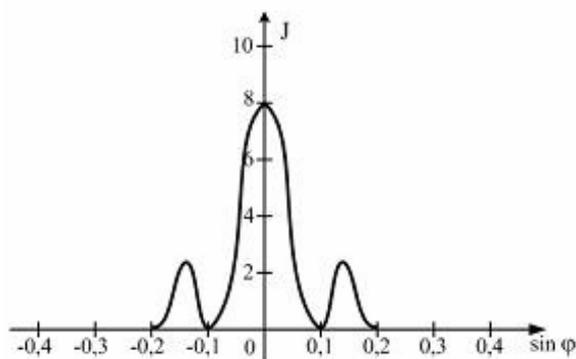
**1.50.** На мыльную пленку ( $n=1,3$ ), находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине пленки отраженный свет с длиной волны  $\lambda=0,55$  мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

**1.51.** Пучок монохроматических ( $\lambda = 0,55$  мкм) световых волн падает под углом  $30^\circ$  на находящуюся в воздухе мыльную пленку ( $n=1,3$ ). При какой наименьшей толщине пленки отраженные световые волны будут максимально ослаблены интерференцией?

**1.52.** Пучок монохроматических ( $\lambda = 0,6$  мкм) световых волн падает под углом  $30^\circ$  на находящуюся в воздухе мыльную пленку ( $n=1,3$ ). При какой наименьшей толщине пленки отраженные световые волны будут максимально усилены интерференцией?

**1.53.** На щель шириной 50 мкм падает нормально монохроматический свет ( $\lambda=600$  нм). Определите угол  $\varphi$  между первоначальным направлением света и направлением на четвертую темную дифракционную полосу.

**1.54.** Зависимость интенсивности монохроматического излучения длиной волны 500 нм от синуса угла дифракции представлена на рисунке. Чему равна ширина щели, на которой наблюдается дифракция?



**1.55.** На узкую щель шириной 0,05 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=694$  нм. Определите направление света на вторую светлую дифракционную полосу (по отношению к первоначальному направлению света).

**1.56.** На узкую щель шириной 0,05 мм падает нормально свет с длиной волны 694 нм. Под каким углом будет наблюдаться второй дифракционный максимум?

**1.57.** На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ( $\lambda=0,6$  мкм). Найдите общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка?

**1.58.** На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Постоянная дифракционной решетки 0,005 мм. Найдите общее число дифракционных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.

**1.59.** На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 700 нм. Постоянная дифракционной решетки 0,006 мм. Найдите общее число дифракционных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.

**1.60.** На дифракционную решетку, постоянная которой 0,001 мм, падает нормально свет с длиной волны 0,655 мкм. Под каким углом наблюдается максимум 4-го порядка?

**1.61.** На дифракционную решетку, постоянная которой 0,002 мм, падает нормально свет с длиной волны 0,550 мкм. Под каким углом наблюдается максимум 3-го порядка?

**1.62.** Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр второго порядка на угол  $5^\circ$ . На какой угол она отклоняет спектр 4-го порядка?

**1.63.** Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр второго порядка на угол  $10^\circ$ . На какой угол она отклоняет спектр 3-го порядка?

**1.64.** Сколько штрихов на 1мм содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете с длиной волны 700 нм максимум 2-го порядка отклонен на угол  $7^\circ$ ?

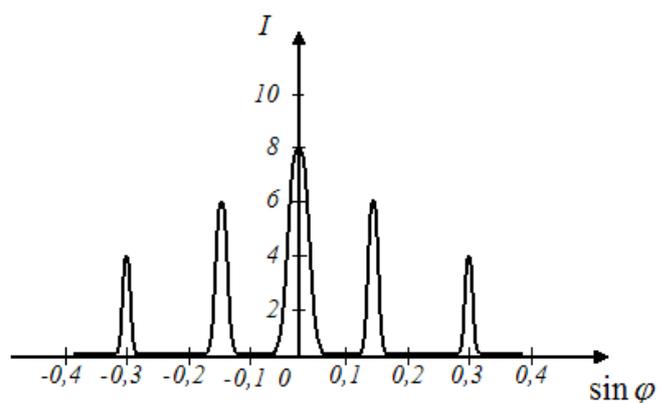
**1.65.** Какова постоянная дифракционной решетки, если максимум первого порядка для света с длиной волны 546 нм наблюдается под углом  $19^\circ$ .

**1.66.** Найдите наибольший порядок максимума для света с длиной волны 589 нм, если постоянная дифракционной решетки равна 2 мкм.

**1.67.** Определите число штрихов на 1мм дифракционной решетки, если углу  $30^\circ$  соответствует максимум четвертого порядка для света с длиной волны 0,5 мкм.

**1.68.** На щель шириной 0,1 мм нормально падает свет с длиной волны 0,6 мкм. Экран, на котором наблюдается дифракционная картина, расположен на расстоянии 1 м от нее. Определите расстояние между первыми дифракционными максимумами, расположенными по обе стороны от центрального максимума.

**1.69.** При дифракции на дифракционной решетке с периодом, равным 0,004 мм, наблюдается зависимость интенсивности монохроматического излучения от синуса угла дифракции, представленная на рисунке (изображены только главные максимумы). Чему равна длина волны монохроматического излучения?



**1.70.** На дифракционную решетку по нормали к ее поверхности падает плоская световая волна с длиной волны  $\lambda$ . Если постоянная решетки  $4,5\lambda$ , то чему равно общее число главных максимумов, наблюдаемых в фокальной плоскости собирающей линзы?

**1.71.** Дифракционная решетка содержит 120 штрихов на 1 мм. Найдите длину волны монохроматического света, падающего на решетку, если угол между двумя спектрами первого порядка равен  $\Delta\varphi = 10^\circ$ .

**1.72.** Дифракционная решетка содержит 150 штрихов на 1 мм. Найдите длину волны монохроматического света, падающего на решетку, если угол между двумя спектрами первого порядка равен  $\Delta\varphi = 8^\circ$ .

**1.73.** Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр третьего порядка на угол  $30^\circ$ . На какой угол отклонит она спектр четвертого порядка?

**1.74.** Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на 1 мм. На решетку падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 590$  нм). Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

**1.75.** На поверхность дифракционной решетки нормально к ее поверхности падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в 3,5 раза больше длины световой волны. Найдите общее число дифракционных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.

**1.76.** Период дифракционной решетки в 5 раз больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определите угол  $\alpha$  между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

**1.77.** На поверхность дифракционной решетки нормально к ее поверхности падает монохроматический свет. Период дифракционной решетки в 4 раза больше длины световой волны. На какой угол она отклоняет спектр 2-го порядка?

**1.78.** Постоянная дифракционной решетки в 6 раз больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определите угол между двумя вторыми симметричными дифракционными максимумами.

**1.79.** На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Угол дифракции для натриевой линии ( $\lambda = 589$  нм) в спектре первого порядка был

найден равным  $17^{\circ}8'$ . Некоторая линия дает в спектре второго порядка угол дифракции  $24^{\circ}12'$ . Найдите длину волны этой линии и число штрихов на 1 мм решетки.

**1.80.** На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок лучей белого света. Спектры второго и третьего порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ( $\lambda=400$  нм) спектра третьего порядка?

**1.81.** Определите длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 300 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого и второго порядков составляет  $12^{\circ}$ .

**1.82.** На дифракционную решетку длиной 1,5 мм, содержащую 3000 штрихов, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Определите угол, соответствующий последнему максимуму.

**1.83.** На пути естественного света помещены две пластины турмалина. После прохождения пластины 1 свет полностью поляризован.  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности света, прошедшего через пластинки 1 и 2 соответственно, угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$   $\varphi = 60^{\circ}$ . Чему равно соотношение между  $I_1$  и  $I_2$ ?

**1.84.** На пути естественного света помещены две пластины турмалина. После прохождения пластины 1 свет полностью поляризован.  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности света, прошедшего через пластинки 1 и 2 соответственно, угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$   $\varphi = 45^{\circ}$ . Чему равно соотношение между  $I_1$  и  $I_2$ ?

**1.85.** На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован.  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно,  $I_1 = I_2$ . Чему равен угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$ ?

**1.86.** На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован.  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно,  $I_2 = \frac{3}{4}I_1$ . Чему равен угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$ ?

**1.87.** Угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен  $60^\circ$ . Во сколько раз увеличится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол уменьшить до  $30^\circ$ ?

**1.88.** Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен  $30^\circ$ . Определите соотношение между интенсивностью света, выходящего из поляризатора, и интенсивностью света, выходящего из анализатора.

**1.89.** Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен  $90^\circ$ . Определите соотношение между интенсивностью света, выходящего из поляризатора, и интенсивностью света, выходящего из анализатора.

**1.90.** Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определите угол между главными плоскостями николей.

**1.91.** Естественный свет с интенсивностью  $I_0$  падает на вход устройства, состоящего из двух скрещенных поляроидов. Между поляроидами поместили третий поляроид, ось которого составляет с осью первого угол  $\alpha$ . Чему равно отношение интенсивности света, прошедшего через систему, к интенсивности света, падающего на систему?

**1.92.** Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 10 раз. Пренебрегая поглощением света, определите угол между главными плоскостями николей.

**1.93.** Угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен  $30^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до  $45^\circ$ ?

**1.94.** Анализатор в 4 раза уменьшает интенсивность света, приходящего к нему от поляризатора. Определите угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

**1.95.** Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшается интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор?

**1.96.** Пучок естественного света падает на систему из трех поляризаторов, плоскость пропускания каждого из которых повернута на угол  $30^\circ$  относительно плоскости пропускания предыдущего поляризатора. Какая часть светового потока проходит через эту систему?

**1.97.** Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через два поляризатора, расположенных так, что угол между их главными плоскостями составляет  $60^\circ$ , а в каждом из поляризаторов теряется 8 % интенсивности падающего на него света.

**1.98.** Естественный свет проходит через два поляризатора, угол между главными плоскостями которых  $30^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения этой системы?

**1.99.** Естественный свет проходит через два поляризатора, угол между главными плоскостями которых  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения этой системы? Считать, что каждый поляризатор отражает и поглощает 10 % падающего на него света.

**1.100.** Найти угол полной поляризации при отражении света от стекла, показатель преломления которого 1,57.

**1.101.** Предельный угол полного отражения для некоторого вещества равен  $30^\circ$ . Чему равен для этого вещества угол Брюстера?

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

**1.103.** Определите угол Брюстера для стекла, показатель преломления которого равен 1,57.

**1.104.** Предельный угол полного отражения для некоторого вещества равен  $45^\circ$ . Чему равен для этого вещества угол Брюстера?

**1.105.** При падении света из воздуха на диэлектрик отраженный луч полностью поляризован. Угол преломления равен  $30^\circ$ . Чему равен показатель преломления диэлектрика?

**1.106.** Чему равен угол между отраженным и преломленным лучами при падении света на границу раздела двух прозрачных сред под углом Брюстера?

**1.107.** Угол Брюстера при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен  $57^\circ$ . Определите скорость света в этом кристалле.

**1.108.** Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный свет полностью поляризован. Показатель преломления стекла 1,5. Определите, какой угол образует отраженный луч с падающим лучом.

**1.109.** При падении света из воздуха на диэлектрик отраженный луч полностью поляризован. Если угол падения  $60^\circ$ , то чему равен угол преломления?

**1.110.** Пучок света, идущий в воздухе, падает на поверхность жидкости под углом  $54^\circ$ . Определите угол преломления лучей, если отраженный луч полностью поляризован.

**1.111.** Пучок естественного света падает на стекло с показателем преломления, равным 1,73. Определите, при каком угле преломления отраженный от стекла пучок света будет полностью поляризован.

**1.112.** Угол максимальной поляризации при отражении света от некоторой среды равен  $64^\circ$ . Определите скорость света в этой среде.

**1.113.** Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный луч образует угол  $96^\circ$  с падающим лучом. Определите показатель преломления жидкости, если отраженный свет полностью поляризован. Показатель преломления стекла 1,6.

**1.114.** При прохождении света через трубку длиной 0,15 м, содержащую 10 %-й раствор сахара, плоскость поляризации света повернулась на угол  $12,4^\circ$ . В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной 0,12 м, плоскость поляризации повернулась на  $7,2^\circ$ . Определите концентрацию второго раствора.

## Варианты задач для домашней контрольной работы

Вариант	Номера задач				
<b>1</b>	1.1	1.26	1.53	1.83	1.100
<b>2</b>	1.2	1.27	1.54	1.84	1.101
<b>3</b>	1.3	1.28	1.55	1.85	1.102
<b>4</b>	1.4	1.29	1.56	1.86	1.103
<b>5</b>	1.5	1.30	1.57	1.87	1.104
<b>6</b>	1.6	1.31	1.58	1.88	1.105
<b>7</b>	1.7	1.32	1.59	1.89	1.106
<b>8</b>	1.8	1.33	1.60	1.90	1.107
<b>9</b>	1.9	1.34	1.61	1.91	1.108
<b>10</b>	1.10	1.35	1.62	1.92	1.109
<b>11</b>	1.11	1.36	1.63	1.93	1.110
<b>12</b>	1.12	1.37	1.64	1.94	1.111
<b>13</b>	1.13	1.38	1.65	1.95	1.112
<b>14</b>	1.14	1.39	1.66	1.96	1.113
<b>15</b>	1.15	1.40	1.67	1.97	1.114
<b>16</b>	1.16	1.41	1.68	1.98	1.112
<b>17</b>	1.17	1.42	1.69	1.99	1.113
<b>18</b>	1.18	1.43	1.70	1.95	1.114
<b>19</b>	1.19	1.43	1.71	1.94	1.100
<b>20</b>	1.20	1.45	1.72	1.93	1.101
<b>21</b>	1.21	1.46	1.73	1.92	1.102
<b>22</b>	1.22	1.47	1.74	1.91	1.103
<b>23</b>	1.23	1.48	1.75	1.90	1.104
<b>24</b>	1.24	1.49	1.76	1.89	1.105
<b>25</b>	1.25	1.50	1.77	1.88	1.106
<b>26</b>	1.8	1.51	1.78	1.87	1.107
<b>27</b>	1.12	1.52	1.79	1.86	1.108
<b>28</b>	1.16	1.36	1.80	1.85	1.109
<b>29</b>	1.18	1.26	1.81	1.84	1.110
<b>30</b>	1.20	1.41	1.82	1.83	1.111

## 2. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

**Квантовая оптика** – раздел оптики, изучающий корпускулярные свойства света (частиц-корпускул, фотонов света). Согласно гипотезе Планка свет излучается и поглощается отдельными «порциями» – квантами (фотонами).

Энергия фотона выражается формулой

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; \quad (2.1)$$

импульс фотона выражается формулой

$$p_p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}; \quad (2.2)$$

масса фотона выражается формулой

$$m_p = \frac{hf}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}, \quad (2.3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$c$  – скорость света в вакууме,  $c = 3 \cdot 10^8$   $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Основные оптические явления, объясняемые квантовой теорией – это фотоэффект и давление света.

**Фотоэффект** – это явление взаимодействия фотонов света с веществом, в результате которого энергия излучения передается электронам вещества. Внешний фотоэффект связан с выходом электронов из металла при облучении его светом определенной частоты.

Экспериментально были получены следующие закономерности фотоэффекта:

– **первый закон фотоэффекта:** при неизменной частоте излучения, падающего на поверхность вещества, число вырываемых электронов прямо пропорционально интенсивности излучения (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода);

– **второй закон фотоэффекта:** максимальная скорость вырванных с поверхности вещества электронов не зависит от интенсивности излучения, а определяется лишь его частотой;

– **третий закон фотоэффекта:** для каждого вещества существует минимальная частота (и, соответственно, максимальная длина волны)

падающего электромагнитного излучения («красная» граница фотоэффекта), начиная с которой возможен внешний фотоэффект.

Используя закон сохранения энергии, Эйнштейн предложил уравнение для внешнего фотоэффекта, выражающее закон сохранения энергии:

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (2.4)$$

где  $A$  – работа выхода электрона из металла;

$m$  – масса электрона;

$\nu_{\max}$  – скорость сообщенная фотоэлектрону.

«Красная» граница фотоэффекта – минимальное значение частоты (или максимальное длины волны), при которой еще возможен фотоэффект,

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (2.5)$$

Из закона сохранения энергии легко получить, что величина задерживающего напряжения  $U_c$  связана с максимальным значением кинетической энергии фотоэлектронов уравнением:

$$-eU_c = \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (2.6)$$

где  $e$  – элементарный электрический заряд,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

$U_c$  – задерживающее напряжение,  $U_c < 0$ .

Используя формулу закона Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, получаем следующее соотношение:

$$eU_c = A - h\nu. \quad (2.7)$$

### **Давление света**

Давление света обусловлено тем, что фотоны как частицы обладают импульсом и передают его телу при отражении и поглощении.

Давление, производимое светом при нормальном падении,

$$p = \frac{E}{c}(1 + \rho) \text{ или } p = w(1 + \rho), \quad (2.8)$$

где  $E$  – энергетическая освещенность поверхности (количество энергии, падающей на единицу поверхности за единицу времени);

$c$  – скорость света в вакууме;

$\rho$  – коэффициент отражения (для зеркальной поверхности  $\rho = 1$ ; для абсолютно черной поверхности  $\rho = 0$ );  
 $w$  – объемная плотность энергии излучения.

$$E = N h \nu, \quad (2.9)$$

где  $N$  – число фотонов, падающих на единицу площади поверхности за единицу времени.

**Тепловым излучением** называется электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела.

К характеристикам теплового излучения относятся:

**поток излучения** (мощность излучения)

$$\Phi_e = \frac{\delta Q_e}{dt}; \quad (2.10)$$

**энергетическая светимость**

$$M_e = \frac{\delta \Phi_e}{dS}; \quad (2.11)$$

**спектральная плотность энергетической светимости**

$$M_{e,\lambda} = \frac{\delta M_e}{d\lambda}; \quad (2.12)$$

**коэффициент пропускания**

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi_{0e}}; \quad (2.13)$$

**коэффициент отражения**

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{0e}}; \quad (2.14)$$

**коэффициент поглощения**

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_{0e}}, \quad (2.15)$$

где  $\Phi_{0e}$  – поток (мощность) падающего излучения;

$\Phi_{\text{пр}}$  – поток прошедшего излучения;

$\Phi_{\text{отр}}$  – поток отражённого излучения;

$\Phi_{\text{погл}}$  – поток поглощённого излучения.

Тело, для которого  $\rho = 0$ ,  $\tau = 0$ ,  $\alpha = 1$ , называется **абсолютно черным**.

Абсолютно черное тело при любой температуре полностью поглощает всю энергию падающего на него излучения любой длины волны. Все реальные тела не являются абсолютно чёрными. Однако некоторые из них в определенных интервалах длин волн близки по своим свойствам к абсолютно чёрному телу. Например, в области длин волн видимого света коэффициенты поглощения сажи, платиновой черни и черного бархата мало отличаются от единицы.

**Спектральным коэффициентом поглощения** (поглощательной способностью) тела называется безразмерная величина – величина, определяемая отношением поглощённого телом потока излучения в малом спектральном интервале (от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ) к потоку падающего на него излучения в том же спектральном интервале:

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{\delta\Phi_{e\text{погл}}}{\delta\Phi_{e\text{пад}}}. \quad (2.16)$$

Поглощательная способность тел зависит от их химического состава, состояния поверхности и температуры и, по определению, не может быть больше единицы. Тело, для которого  $\alpha_{\lambda, T} = \alpha_T = \text{const} < 1$ , называют серым, его поглощательная способность одинакова для всех длин волн, зависит от температуры и химического состава тела и меньше единицы.

## Законы теплового излучения

### Закон Кирхгофа

Отношение спектральной плотности энергетической светимости равновесного излучения тела к его спектральному коэффициенту поглощения не зависит от природы тела; для всех тел оно является универсальной функцией длины волны и температуры:

$$\frac{M_{e,\lambda}}{\alpha_\lambda} = f(\lambda, T). \quad (2.17)$$

## Закон Стефана – Больцмана

Энергетическая светимость абсолютно черного тела  $M_e^0$  прямо пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:

$$M_e^0 = \sigma T^4, \quad (2.18)$$

где  $T$  – термодинамическая температура;

$\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ ).

Энергетическая светимость серого тела:

$$M_e = \alpha_T \sigma T^4, \quad (2.19)$$

где  $\alpha_T$  – спектральный коэффициент поглощения серого тела.

## Первый закон Вина (закон смещения)

Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T}, \quad (2.20)$$

где  $\lambda_{\max}$  – длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения;

$b_1$  – первая постоянная Вина,  $b_1 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}$ .

Спектр излучения абсолютно черного тела имеет характерный максимум (рис. 2.1), который при повышении температуры сдвигается в коротковолновую часть (рис. 2.2).

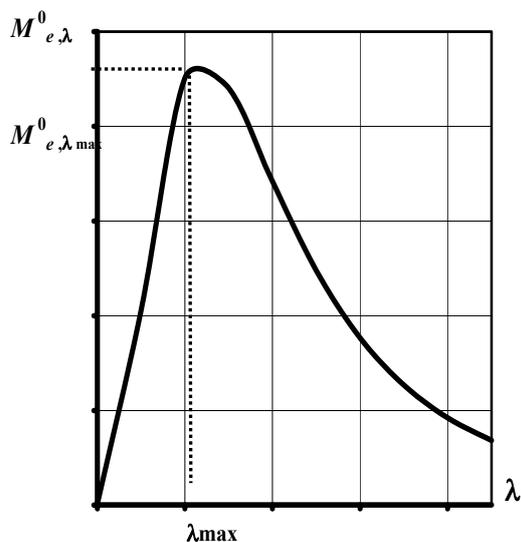


Рис. 2.1

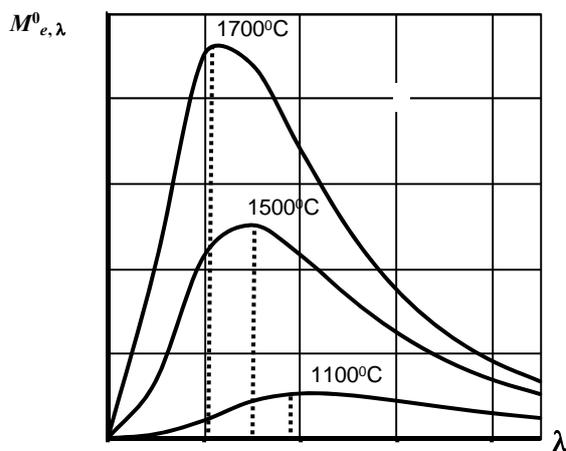


Рис. 2.2

## Второй закон Вина

Максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела прямо пропорционален пятой степени абсолютной температуры

$$M_{e,\lambda(\max)}^0 = b_2 T^5, \quad (2.21)$$

где  $b_2 = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$  – вторая постоянная Вина.

**Эффект Комптона** – некогерентное рассеяние фотонов на свободных электронах. Эффект сопровождается изменением частоты фотонов, часть энергии которых после рассеяния передается электронам (рис. 2.3).

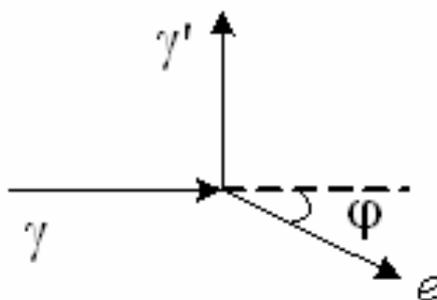


Рис. 2.3

Изменение длины волны  $\Delta\lambda$  фотона при рассеянии его на электроне

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta), \quad (2.22)$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения;  
 $\lambda'$  – длина волны рассеянного излучения;  
 $\theta$  – угол рассеяния.

Величина  $\lambda_C = \frac{h}{m_0 c}$  называется **комптоновской длиной волны**, где

$m_0$  – масса покоя электрона. (При рассеянии фотона на электроне  $\lambda_C = 2,436$  пм.)

В эффекте Комптона выполняются закон сохранения энергии и закон сохранения импульса, которые имеют следующий вид:

$$W_0 + \varepsilon_\gamma = W + \varepsilon'_\gamma - \text{закон сохранения энергии}; \quad (2.23)$$

$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}_e + \vec{p}'_\gamma - \text{закон сохранения импульса,} \quad (2.24)$$

где  $W_0 = m_0 c^2$  – энергия электрона до столкновения;

$\epsilon_\gamma = h\nu$  – энергия налетающего фотона;

$W = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}$  – энергия электрона после столкновения (используется релятивистская формула, так как скорость электрона отдачи в общем случае значительна);

$\epsilon'_\gamma = h\nu'$  – энергия рассеянного фотона.

### Примеры решения задач

1. Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, равна 0,58 мкм. Определите энергетическую светимость поверхности тела.

Дано:	СИ	Решение:
$\lambda_{\max} = 0,58 \text{ мкм}$	$580 \cdot 10^{-9} \text{ м}$	Согласно первому закону Вина
$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$		$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T},$
$b_1 = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}^4$		где $T$ – термодинамическая температура тела.
$M_e^0 - ?$		Выразив из этой формулы $T$ , получаем
		$T = \frac{b_1}{\lambda_{\max}}.$

Подставив полученное выражение для температуры в формулу Стефана – Больцмана для определения энергетической светимости абсолютно черного тела, получим следующее:

$$M_e^0 = \sigma \left( \frac{b_1}{\lambda_{\max}} \right)^4.$$

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$M_e^0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{580 \cdot 10^{-9}} \right)^4 = 35,4 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 35,4 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ:  $35,4 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$ .

2. Красная граница фотоэффекта для никеля равна 0,257 мкм. Найдите длину волны света, падающего на никелевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной 1,5 В.

Дано:	СИ	Решение:
$\lambda_{\min} = 0,257 \text{ мкм}$	$257 \cdot 10^{-9} \text{ м}$	Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта
$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$		$\frac{hc}{\lambda} = A + E_{k \max} \quad (1)$
$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$		Красная граница фотоэффекта определяется из следующего выражения
$U_c = 1,5 \text{ В}$		$\frac{hc}{\lambda_{\min}} = A \quad (2)$
$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$		
$\lambda - ?$		

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов может быть определена через задерживающую разность потенциалов

$$eU_c = E_{k \max} \quad (3)$$

Подставляя выражение (2) и (3) в (1), получим

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} + eU_c.$$

Выразим из последнего соотношения длину света:

$$\lambda = \frac{hc\lambda_{\min}}{hc + eU_c\lambda_{\min}}.$$

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 257 \cdot 10^{-9}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 257 \cdot 10^{-9}} = 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,196 \text{ мкм}.$$

Ответ: 0,196 мкм.

3. В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол  $90^\circ$ . Энергия рассеянного фотона 0,4 МэВ. Определите энергию фотона до рассеяния.

Дано:  
 $\theta = 90^\circ$   
 $\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$   


---

 $\varepsilon_1 = ?$

Решение:

Воспользуемся формулой Комптона

$$\lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Выразим длины волн  $\lambda'$  и  $\lambda$  через энергии  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_1$ , воспользовавшись формулой  $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$ .

Тогда получим

$$\frac{hc}{\varepsilon_2} - \frac{hc}{\varepsilon_1} = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Поделим правую и левую части получившегося равенства на  $hc$  и выразим из полученной формулы энергию  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2 m_0 c^2}{m_0 c^2 - 2\varepsilon_2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{\varepsilon_2 E_0}{E_0 - 2\varepsilon_2 \sin^2 \frac{\theta}{2}},$$

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

Вычисления по получившейся формуле удобнее вести во внесистемных единицах, взяв из справочных таблиц значение энергии покоя электрона в мегаэлектронвольтах.

$$\varepsilon_1 = \frac{0,4 \cdot 0,511}{0,511 - 2 \cdot 0,4 \cdot \sin^2 45^\circ} = 1,84 \text{ МэВ}.$$

Ответ: 1,84 МэВ.

## Задачи для самостоятельного решения

**2.1.** Определите длину волны, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости черного тела при температуре  $37^\circ \text{C}$ , и энергетическую светимость тела.

**2.2.** Максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца приходится на длину волны  $0,5 \text{ мкм}$ . Считая, что Солнце излучает как черное тело, определите температуру его поверхности.

**2.3.** Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела равно  $4,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$ . На какую длину волны оно приходится?

**2.4.** На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре 850 К?

**2.5.** Черное тело нагрели от температуры 600 К до температуры 2400 К. Определите, во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость.

**2.6.** Черное тело нагрели от температуры 800 К до температуры 1600 К. Как изменилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости?

**2.7.** При нагревании абсолютно черного тела длина волны, соответствующая максимуму в спектре распределения энергии, изменилась на 590 нм. Определите, на сколько градусов остыло тело, если первоначальная температура его была 2600 К.

**2.8.** Имеются два абсолютно черных источника теплового излучения. Температура одного из них 3000 К. Найдите температуру другого источника, если длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности его энергетической светимости, на 1 мкм больше длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости первого источника.

**2.9.** Максимум спектральной плотности энергетической светимости звезды приходится на длину волны 660 нм. Считая, что звезда излучает как абсолютно черное тело, определите температуру поверхности звезды.

**2.10.** Температура черного тела уменьшилась в 6 раз. Как изменилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости?

**2.11** Абсолютно черное тело остыло от температуры 3000 К до температуры 1500 К. На сколько в результате остывания тела изменилась длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости?

**2.12.** Определите температуру и энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны  $\lambda = 400$  нм.

**2.13.** Поток излучения абсолютно черного тела равен 1 кВт, максимум энергии излучения приходится на длину волны 1,45 мкм. Определите площадь излучающей поверхности.

**2.14.** Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{01} = 780$  нм) на фиолетовую ( $\lambda_{02} = 390$  нм)?

**2.15.** Абсолютно черное тело находится при температуре 2900 К. В результате остывания тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на  $\Delta\lambda = 9$  мкм. До какой температуры охладилось тело?

**2.16.** Из смотрового окошечка печи излучается поток  $2040 \frac{\text{Дж}}{\text{мин}}$ . Определите температуру печи, если площадь отверстия равна  $6 \text{ см}^2$ .

**2.17.** Абсолютно черное тело имеет температуру 400 К. Какова будет температура тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в 10 раз?

**2.18.** Мощность излучения абсолютно черного тела равна 10 кВт. Найдите площадь излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности его энергетической светимости, равна 700 нм.

**2.19.** Мощность излучения абсолютно черного тела равна 34 кВт. Найдите температуру этого тела, если известно, что поверхность его  $0,6 \text{ м}^2$ .

**2.20.** При температуре окружающей среды  $17^\circ\text{C}$  тело излучает в 81 раз больше энергии, чем поглощает. Чему равна температура тела в градусах Цельсия?

**2.21.** При остывании абсолютно черного тела в результате лучеиспускания длина волны, соответствующая максимуму в спектре распределения энергии, изменилась на 500 нм. Определите, на сколько градусов остыло тело, если первоначальная температура его была 2000 К.

**2.22.** Поток излучения абсолютно черного тела 4 кВт. Максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 550 нм. Определите площадь излучающей поверхности.

**2.23.** Максимум испускательной способности приходится на длину волны 0,5 мкм. Считая, что Солнце излучает как черное тело, определите температуру его поверхности и мощность излучения. Радиус Солнца принять равным  $6,95 \cdot 10^8$  м.

**2.24.** Температура черного тела при нагревании изменилась от 1000 К до 3000 К. Во сколько раз увеличилась при этом его энергетическая светимость?

**2.25.** Во сколько раз нужно увеличить термодинамическую температуру абсолютно черного тела, чтобы его энергетическая светимость возросла в 4 раза?

**2.26.** Максимум излучения абсолютно черного тела вследствие изменения температуры сместился с 1,5 мкм на 0,5 мкм. Во сколько раз изменилась энергетическая светимость тела?

**2.27.** Вследствие изменения температуры максимум излучения абсолютно черного тела сместился с 1,2 мкм на 0,4 мкм. Во сколько раз изменилась спектральная плотность энергетической светимости тела?

**2.28.** Найдите мощность, излучаемую абсолютно черным шаром радиусом 10 см, который находится в комнате при температуре 300 К.

**2.29.** Считая, что Земля излучает как серое тело, находящееся при температуре 280 К, определите спектральный коэффициент поглощения Земли. Энергетическая светимость ее поверхности равна  $90 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

**2.30.** С поверхности сажи площадью  $4 \text{ см}^2$  при температуре 600 К за 15 минут излучается энергия 180 Дж. Определите спектральный коэффициент поглощения сажи.

**2.31.** Определите длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, обладающего скоростью  $2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**2.32.** Определите длину волны фотона, масса которого равна массе электрона.

**2.33.** Определите длину волны фотона, энергия которого равна энергии протона, обладающего скоростью  $2,5 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**2.34.** Найдите частоту и длину волны излучения, масса фотонов которого равна массе покоя электрона.

**2.35.** Каков импульс фотона ультрафиолетового излучения с длиной волны 100 нм?

**2.36.** Каков импульс фотона, энергия которого равна 3 эВ?

**2.37.** Определите энергию фотонов, соответствующих длине волны 760 нм.

**2.38.** Определите импульс фотонов, соответствующих длине волны 400 нм.

**2.39.** Определите массу фотонов, соответствующих длине волны 560 нм.

**2.40.** При какой скорости электроны будут иметь энергию, равную энергии фотонов ультрафиолетового света с длиной волны 200 нм?

**2.41.** Возникнет ли фотоэффект в цинке под действием облучения, имеющего длину волны 450 нм?

**2.42.** При какой минимальной энергии квантов произойдет фотоэффект на цинковой пластине?

**2.43.** Найдите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, вырванных с катода, если задерживающее напряжение равно 1,5 В.

**2.44.** Максимальная скорость фотоэлектронов, вылетающих с поверхности серебра при облучении его гамма-квантами, равна  $300 \frac{\text{Мм}}{\text{с}}$ .

Определите энергию гамма-квантов.

**2.45.** Какую максимальную кинетическую энергию имеют электроны, вырванные из оксида бария, при облучении светом с частотой 1 ПГц?

**2.46.** К вакуумному фотоэлементу, у которого катод выполнен из цезия, приложено задерживающее напряжение 2 В. При какой длине волны падающего на катод света появится фототок?

**2.47.** Определите длину волны лучей, фотоны которых имеют такую же энергию, что и электрон, ускоренный напряжением 4 В.

**2.48.** Красная граница фотоэффекта для цезия 640 нм. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, если на цезий падают лучи с длиной волны 200 нм.

**2.49.** На фотоэлемент с катодом из рубидия падают лучи с длиной волны 100 нм. Найдите наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

**2.50.** На поверхность металла падают монохроматические лучи с длиной волны 150 нм. Красная граница фотоэффекта 200 нм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

**2.51.** На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетовых лучей ( $\lambda = 0,2$  мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов 2,2 В. Определите работу выхода электронов из металла.

**2.52.** Катод вакуумного фотоэлемента освещается светом с энергией квантов 10 эВ. Фототок прекращается при подаче на фотоэлемент задерживающего напряжения 4 В. Чему равна работа выхода электронов из катода?

**2.53.** При освещении металла излучением с длиной волны  $\lambda_0$  фототок прекращается при задерживающем напряжении  $U_0$ . Если изменить длину волны излучения в 1,5 раза, то задерживающее напряжение увеличится в 2 раза. Работа выхода электронов из металла 4 эВ. Чему равно задерживающее напряжение  $U_0$  в вольтах для излучения с длиной волны  $\lambda_0$ ?

**2.54.** Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цинка светом с длиной волны 0,25 мкм.

**2.55.** Чему равна красная граница фотоэффекта для цинка?

**2.56.** Красная граница фотоэффекта у рубидия равна 0,81 мкм. Определите скорость фотоэлектронов при облучении рубидия монохроматическим светом с длиной волны 0,40 мкм.

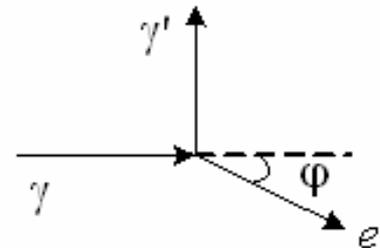
**2.57.** Рубидий облучают монохроматическим светом с длиной волны 0,45 мкм. Работа выхода фотоэлектронов с поверхности рубидия  $25 \cdot 10^{-20}$  Дж. Какую задерживающую разность потенциалов нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратился фототок?

**2.58.** Катод вакуумного фотоэлемента освещается светом с длиной волны 0,38 мкм. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной 1,4 В. Найдите работу выхода электронов из катода.

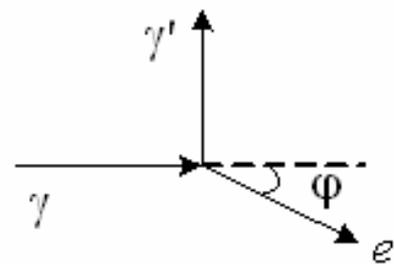
**2.59.** При поочередном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн 0,35 мкм и 0,54 мкм обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в два раза. Найдите работу выхода с поверхности этого металла.

**2.60.** Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта 307 нм и максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж?

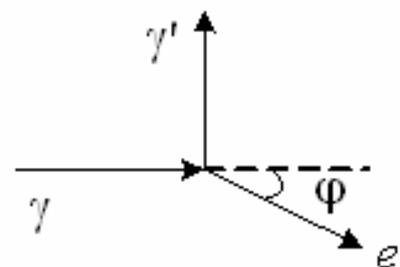
**2.61.** На рисунке показаны направления падающего фотона ( $\gamma$ ), рассеянного фотона ( $\gamma'$ ) и электрона отдачи ( $e$ ). Угол рассеяния  $90^\circ$ . Направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол  $\varphi = 30^\circ$ . Запишите формулу связи импульса падающего фотона и импульса электрона отдачи.



**2.62.** На рисунке показаны направления падающего фотона ( $\gamma$ ), рассеянного фотона ( $\gamma'$ ) и электрона отдачи ( $e$ ). Угол рассеяния  $90^\circ$ . Направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол  $\varphi = 30^\circ$ . Запишите формулу связи импульса рассеянного фотона и импульса электрона отдачи.



**2.63.** Эффект Комптона наблюдается на почти свободных электронах. На рисунке показаны направления падающего фотона ( $\gamma$ ), рассеянного фотона ( $\gamma'$ ) и электрона отдачи ( $e$ ). Угол рассеяния  $90^\circ$ , направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол  $\varphi = 30^\circ$ . Как изменится при рассеянии импульс фотона?



**2.64.** Фотон с энергией 0,09 МэВ рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего его длина волны изменилась на 2,5 нм. Найдите угол, под которым вылетел комптоновский электрон.

**2.65.** Фотон с длиной волны 4,86 пм рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроне. Комptonовская длина волны для электрона равна  $2,43 \cdot 10^{-12}$  м. Чему равно отношение максимально возможной длины волны рассеянного фотона к его первоначальной длине?

**2.66.** Гамма-фотон с энергией 1,02 МэВ в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на угол  $90^\circ$ . Определите кинетическую энергию электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

**2.67.** В результате комптоновского рассеяния на свободном электроне энергия гамма-фотона увеличилась в два раза. Найдите кинетическую энергию электрона отдачи, если угол рассеяния фотона равен  $60^\circ$ . До столкновения электрон покоился.

**2.68.** При рассеянии фотона на свободном электроне кинетическая энергия отдачи электрона максимальна. Чему при этом равен угол рассеяния в градусах?

**2.69.** В явлении Комптона энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен  $90^\circ$ . Комptonовская длина волны электрона  $2,4 \cdot 10^{-12}$  м. Чему равна длина волны рассеянного фотона?

**2.70.** Фотон с энергией 0,15 МэВ рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего его длина волны изменилась на 3 нм. Найдите угол, под которым вылетел комптоновский электрон.

**2.71.** Первоначально покоившийся свободный электрон в результате комптоновского рассеяния на нем гамма фотона с энергией 0,51 МэВ приобрел кинетическую энергию 0,06 МэВ. Чему равен угол рассеяния фотона?

**2.72.** Гамма-фотон с длиной волны 2,43 пм испытал комптоновское рассеяние на свободном электроне строго назад. Определите кинетическую энергию электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

**2.73.** Гамма-фотон с длиной волны 2,4 пм испытал комптоновское рассеяние на свободном электроне строго назад. Определите импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

**2.74.** На зеркальную поверхность направляют поочередно поток одинаковой интенсивности фиолетовых, зеленых, желтых и красных лучей.

Для лучей какого цвета давление света на эту поверхность будет наименьшим?

**2.75.** Как изменится световое давление, если зачерненную пластинку, на которую падает свет, заменить на зеркальную той же площади?

**2.76.** На зеркальную пластинку падает поток света. Как изменится световое давление, если число фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, увеличить в 2 раза, а зеркальную пластинку заменить черной?

**2.77.** На черную пластинку падает поток света. Как изменится световое давление, если число фотонов, падающих на единицу площади поверхности в единицу времени, увеличить в 4 раза, а черную пластинку заменить зеркальной?

**2.78.** Один и тот же световой поток падает нормально на зеркальную и абсолютно черную поверхность. Чему равно отношение давления света на первую и вторую поверхности?

**2.79.** На зеркальную пластинку падает поток света. Число фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, увеличили в два раза, а зеркальную поверхность заменили черной. Чему равно отношение светового давления к первоначальному?

**2.80.** Давление света на поверхность, имеющую коэффициент отражения 0,25, составило 0,25 мкПа. Чему равна энергетическая освещенность этой поверхности?

**2.81.** Чему равно давление света (в мкПа) на поверхность, имеющую коэффициент отражения 0,5, при энергетической освещенности  $200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ?

**2.82.** Давление света на поверхность при энергетической освещенности  $120 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  составило 0,5 мкПа. Найдите коэффициент отражения этой поверхности в процентах.

**2.83.** Свет, падая перпендикулярно на абсолютно черную поверхность, оказывает такое же давление, как и на зеркальную. Чему равен угол падения (отсчитывая от нормали) на зеркальную поверхность?

**2.84.** На поверхность площадью  $3,1 \text{ мм}^2$  за время 5,1 с падает свет, энергия которого 20 Дж. Определите световое давление на поверхность, если она полностью поглощает лучи.

**2.85.** На поверхность площадью  $4,2 \text{ мм}^2$  за время  $6,2 \text{ с}$  падает свет, энергия которого  $26 \text{ Дж}$ . Определите световое давление на поверхность, если она полностью отражает лучи.

**2.86.** Монохроматический пучок света с длиной волны  $500 \text{ нм}$ , падая нормально на поверхность, производит на нее давление  $973 \text{ нПа}$ . Сколько квантов света падает каждую секунду на единицу площади этой поверхности? (Коэффициент отражения света равен  $0,5$ .)

**2.87.** Определите давление солнечных лучей, нормально падающих на зеркальную поверхность. Интенсивность солнечного излучения принять равной  $1,37 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ .

**2.88.** Плотность потока энергии в импульсе излучения лазера может достигать значения  $10^{20} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Определите давление такого излучения, нормально падающего на черную поверхность.

**2.89.** Свет с длиной волны  $0,5 \text{ мкм}$  нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление  $4 \text{ мкПа}$ . Определите число фотонов, каждую секунду падающих на  $1 \text{ см}^2$  этой поверхности.

**2.90.** Свет с длиной волны  $0,6 \text{ мкм}$  нормально падает на черную поверхность и производит на нее давление  $9 \text{ мкПа}$ . Определите число фотонов, каждую секунду падающих на  $1 \text{ мм}^2$  этой поверхности.

## Варианты задач для домашней контрольной работы

Вариант	Номера задач		
<b>1</b>	2.1	2.31	2.61
<b>2</b>	2.2	2.32	2.62
<b>3</b>	2.3	2.33	2.63
<b>4</b>	2.4	2.34	2.64
<b>5</b>	2.5	2.35	2.65
<b>6</b>	2.6	2.36	2.66
<b>7</b>	2.7	2.37	2.67
<b>8</b>	2.8	2.38	2.68
<b>9</b>	2.9	2.39	2.69
<b>10</b>	2.10	2.40	2.70
<b>11</b>	2.11	2.41	2.71
<b>12</b>	2.12	2.42	2.72
<b>13</b>	2.13	2.43	2.74
<b>14</b>	2.14	2.44	2.73
<b>15</b>	2.15	2.45	2.75
<b>16</b>	2.16	2.46	2.76
<b>17</b>	2.17	2.47	2.77
<b>18</b>	2.18	2.48	2.78
<b>19</b>	2.19	2.49	2.79
<b>20</b>	2.20	2.50	2.80
<b>21</b>	2.21	2.51	2.81
<b>22</b>	2.22	2.52	2.82
<b>23</b>	2.23	2.53	2.83
<b>24</b>	2.24	2.54	2.84
<b>25</b>	2.25	2.55	2.85
<b>26</b>	2.26	2.56	2.86
<b>27</b>	2.27	2.57	2.87
<b>28</b>	2.28	2.58	2.88
<b>29</b>	2.29	2.59	2.89
<b>30</b>	2.30	2.60	2.90

### 3. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

**Квантовая механика** – раздел физики, объектами изучения в котором являются кристаллы, молекулы, атомы, атомные ядра и элементарные частицы.

Атом является наименьшей частицей химического элемента, определяющей его основные свойства. Опытами Э.Резерфорда была обоснована планетарная модель атома. В центре атома находится положительно заряженное ядро с зарядом  $Ze$  ( $Z$  – число протонов в ядре, т.е. порядковый номер химического элемента периодической системы Менделеева;  $e$  – заряд протона, равный по модулю заряду электрона). Вокруг ядра движутся электроны в электрическом поле ядра. При этом кулоновская сила взаимодействия между ядром и электроном сообщает электрону центростремительное ускорение. Согласно второму закону Ньютона

$$\frac{Zee}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}, \quad (3.1)$$

где  $m_e$  и  $v$  – масса и скорость электрона на орбите радиуса  $r$ ;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Следовательно, существует бесчисленное множество значений радиуса и соответствующих ему значений скорости (а значит, и энергии), удовлетворяющих этому уравнению. Поэтому атомом может испускаться любая, а не вполне определенная порция энергии. Тогда спектры атомов должны быть сплошными. В действительности опыт показывает, что атомы имеют линейчатый спектр.

Согласно классической электродинамике, ускоренно движущиеся электроны должны излучать электромагнитные волны и вследствие этого непрерывно терять энергию. В результате электроны будут приближаться к ядру и в конце концов упадут на него. Таким образом, атом Резерфорда оказывается неустойчивой системой.

В 1913 г. датскому физiku Нильсу Бору удалось связать в единое целое эмпирические закономерности линейчатых спектров, ядерную модель атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света. В основе теории Бора лежат два постулата.

**Первый постулат Бора** (постулат стационарных состояний): в устойчивом состоянии атома электроны движутся по определенным стационар-

ным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии; стационарные орбиты электронов определяются по правилу квантования:

$$L = \frac{nh}{2\pi}, \quad (3.2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж · с;

$n$  – главное квантовое число, определяющее энергетический уровень атома,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;

$L$  – момент импульса электрона,

$$L = m_e v r;$$

здесь  $m_e$  – масса электрона,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;

$v$  – скорость электрона;

$r$  – радиус орбиты электрона.

Тогда

$$m_e v r = \frac{nh}{2\pi}. \quad (3.3)$$

На электрон, движущийся по орбите вокруг ядра, действует кулоновская сила:

$$F_K = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3.4)$$

Для атома водорода  $Z = 1$ . Тогда

$$F_K = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3.5)$$

Решая совместно уравнения (3.3) и (3.5), можно определить:

а) радиус орбиты

$$r = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2; \quad (3.6)$$

б) скорость электрона

$$v = \frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 h n}; \quad (3.7)$$

в) энергию электрона

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}. \quad (3.8)$$

**Энергетический уровень** – энергия, которой обладает электрон атома в определенном стационарном состоянии.

Атом водорода имеет один электрон. Состояние атома с  $n = 1$  называется основным состоянием. Энергия основного состояния  $E_1 = -13,55$  эВ.

В основном состоянии атом способен только поглощать энергию.

При квантовых переходах атомы (молекулы) скачкообразно переходят из одного стационарного состояния в другое, т.е. с одного энергетического уровня на другой. Изменение состояния атомов (молекул) связано с энергетическими переходами электронов с одних стационарных орбит на другие. При этом излучаются или поглощаются электромагнитные волны различных частот.

**Второй постулат Бора** (правило частот): при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон с энергией

$$E = E_m - E_n, \quad (3.9)$$

равной разности энергий соответствующих стационарных состояний ( $E_m$  и  $E_n$  – соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения или поглощения).

Энергия излучается или поглощается отдельными порциями – квантами (фотонами), и энергия каждого кванта (фотона) связана с частотой  $\nu$  излучаемых волн соотношением

$$E = h\nu, \quad (3.10)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Учитывая это, уравнение (3.9) можно записать в виде

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (3.11)$$

Совокупность электромагнитных волн всех частот, которые излучает и поглощает данный атом (молекула), составляет **спектр испускания или поглощения данного вещества**.

**Виды спектров испускания:**

**1) Непрерывные спектры.** В непрерывном спектре представлены длины всех волн. В таком спектре нет разрывов, он состоит из участков разного цвета, переходящих один в другой.

Непрерывные (или сплошные) спектры дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии (лампа накаливания, расплавленная сталь и др.), а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры.

**2) Линейчатые спектры.** Линейчатые спектры испускания состоят из отдельных спектральных линий, разделенных темными промежутками.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах).

**3) Полосатые спектры.** Полосатые спектры испускания состоят из отдельных групп линий, настолько близко расположенных, что они сливаются в полосы. Таким образом, полосатый спектр состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками.

В отличие от линейчатых спектров полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

**Спектр поглощения** можно наблюдать, если на пути излучения, идущего от источника, который дает сплошной спектр испускания, расположить вещество, поглощающее те или иные лучи различных длин волн. При этом вещество поглощает свет тех же длин волн, которые испускает (рис. 3.1).

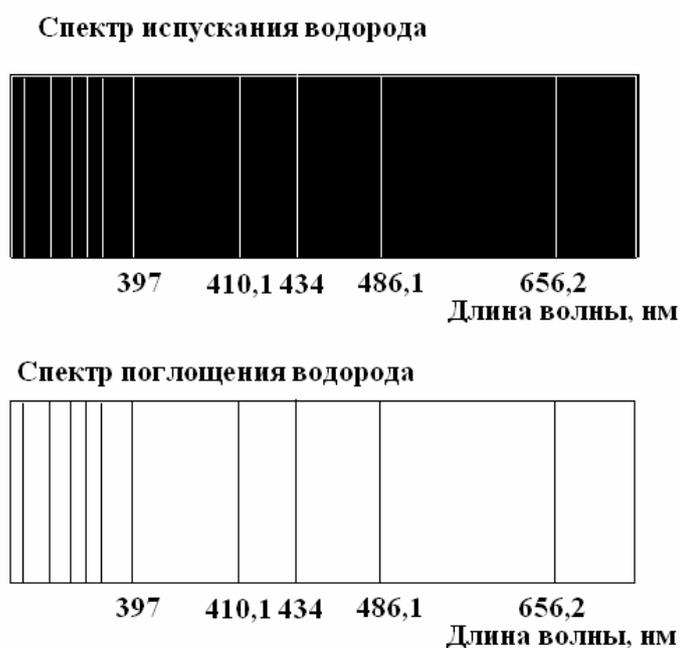


Рис. 3.1

Спектры поглощения, как и спектры испускания, делятся на сплошные, линейчатые и полосатые.

Спектры являются источником различной информации. По виду спектра можно идентифицировать (различать) атомы и молекулы, а по интенсивности спектральных линий определять количество излучающих (поглощающих) атомов. По спектрам можно судить о строении атома (молекулы), структуре и энергетических уровнях.

В спектре атома водорода были выделены группы линий, называемые спектральными сериями. Каждая серия применительно к спектрам испускания соответствует переходам с различных уровней на один и тот же конечный уровень (рис. 3.2, а, б).

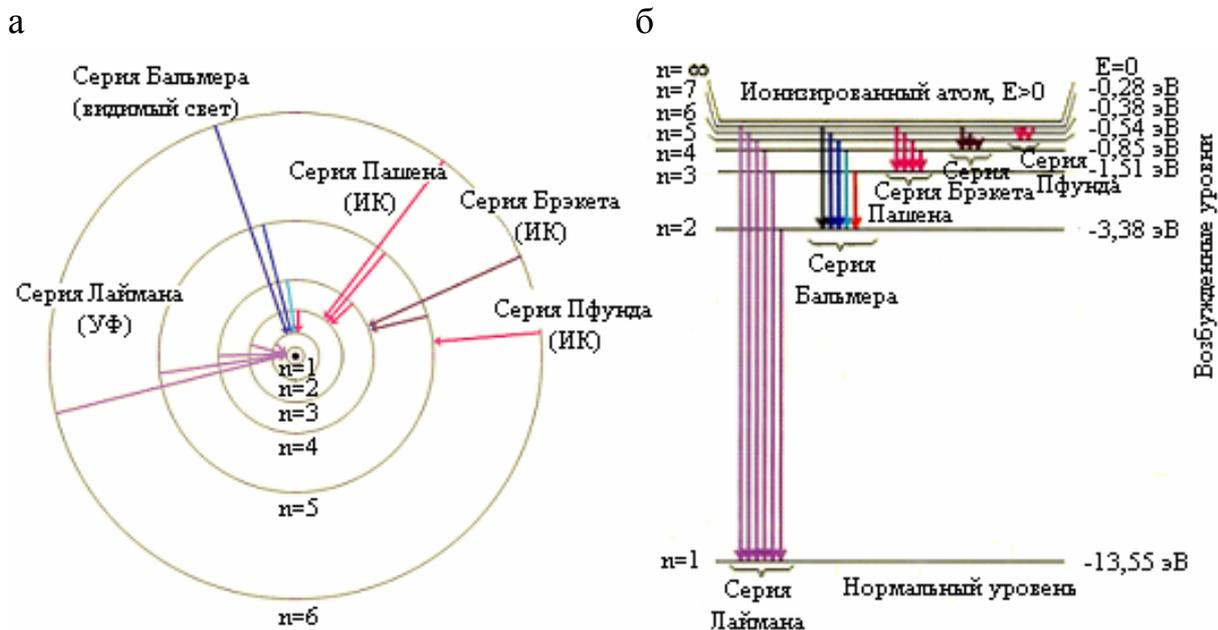


Рис. 3.2

Оказалось, что весь частотный диапазон спектра водородных серий может быть представлен одной формулой (обобщенная формула Бальмера):

$$\nu_{m-n} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3.12)$$

где  $\nu_{m-n}$  – частота излучения, соответствующая переходу с верхних энергетических уровней  $n$  на нижние  $m$ ;

$R$  – постоянная Ридберга,  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ .

Причем различные серии различаются наборами целых чисел  $m$  и  $n$  и названы именами ученых, открывших каждую серию:

$$m = 1; n = 2, 3, 4, \dots \nu_{1-n} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ – серия Лаймана} \quad (3.13)$$

$$m = 2; n = 3, 4, 5, \dots \nu_{2-n} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ – серия Бальмера} \quad (3.14)$$

$$m = 3; n = 4, 5, 6, \dots \nu_{3-n} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ – серия Пашена} \quad (3.15)$$

$$m = 4; n = 5, 6, 7, \dots \nu_{4-n} = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ – серия Брэкета} \quad (3.16)$$

$$m = 5; n = 6, 7, 8, \dots \nu_{5-n} = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ – серия Пфунда} \quad (3.17)$$

$$m = 6; n = 7, 8, 9, \dots \nu_{6-n} = R \left( \frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ – серия Хэмфри} \quad (3.18)$$

Формула (3.14) была экспериментально найдена И.Я. Бальмером и теоретически получена Бором. Линии серии Бальмера находятся в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Серия Лаймана расположена в ультрафиолетовой области частот, а все остальные серии – в инфракрасной области.

### **Квантовые числа**

Состояние электрона в атоме однозначно определяется набором четырех квантовых чисел.

1. Главное квантовое число  $n$  определяет энергетические уровни электрона в атоме и может принимать любые целочисленные значения начиная с единицы:  $n = 1, 2, 3, \dots$

2. Орбитальное квантовое число  $l$  определяет момент импульса электрона в атоме согласно формуле

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}. \quad (3.19)$$

Орбитальное квантовое число при заданном  $n$  принимает значения:  $l = 0, 1, \dots, (n-1)$ .

Состояние электрона, характеризующееся орбитальным квантовым числом  $l=0$ , называют  $s$ -состоянием;  $l=1$  –  $p$ -состоянием;  $l=2$  –  $d$ -состоянием;  $l=3$  –  $f$ -состоянием.

3) Магнитное квантовое число  $m_l$  определяет проекцию момента импульса электрона на заданное направление  $z$  внешнего магнитного поля, принимающую значения, кратные  $\hbar$ :

$$L_{lz} = \hbar m_l. \quad (3.20)$$

Магнитное квантовое число при заданном  $l$  может принимать значения:  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ , т.е. всего  $2l + 1$  значений. Вектор момента импульса электрона в атоме может иметь в пространстве  $2l + 1$  ориентаций.

4) Магнитное спиновое квантовое число  $m_s$  определяет проекцию собственного механического момента импульса (спина) электрона на направление внешнего магнитного поля согласно формуле

$$L_{sz} = \hbar m_s. \quad (3.21)$$

Согласно общим выводам квантовой механики, спин квантуется по закону

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}, \quad (3.22)$$

где  $s$  – спиновое квантовое число.

Магнитное спиновое квантовое число может иметь только два значения:  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ .

Квантовые переходы электронов в атоме, связанные с испусканием и поглощением света, осуществляются не между любыми энергетическими уровнями. Установлены **правила отбора**, т.е. условия, при которых переходы возможны: 1) изменение орбитального квантового числа  $\Delta l$  (орбитальное квантовое число определяет момент импульса электрона в атоме) удовлетворяет условию

$$\Delta l = \pm 1; \quad (3.23)$$

2) изменение магнитного квантового числа  $\Delta m_l$  (магнитное квантовое число определяет проекцию момента импульса электрона на заданное направление) удовлетворяет условию

$$\Delta m_l = 0, \pm 1. \quad (3.24)$$

### Корпускулярно-волновой дуализм

Фотоны, электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными свойствами обладают также и волновыми; а любой частице, обладающей импульсом, можно сопоставить волновой процесс с длиной волны, определяемой по формуле де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (3.25)$$

Количественное соотношение

$$E = h\nu \quad (3.26)$$

также связывает корпускулярную характеристику – энергию  $E$  и волновую характеристику – частоту  $\nu$ .

Наличие волновых свойств у микрочастиц приводит к тому, что нельзя применять понятия классической механики к объектам микромира. Например, нельзя говорить о движении микрочастицы по определенной траектории и об одновременных точных значениях ее координаты и импульса. Согласно **соотношению неопределенностей Гейзенберга** микрочастица (микрообъект) не может иметь одновременно и определенную координату ( $x, y, z$ ) и определенную соответствующую проекцию импульса ( $p_x, p_y, p_z$ ), причем неопределенности этих величин удовлетворяют условию:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar. \quad (3.27)$$

В квантовой теории рассматривается также соотношение неопределенностей для энергии и времени, неопределенности этих величин удовлетворяют условию:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar, \quad (3.28)$$

где  $\Delta E$  – неопределенность энергии некоторого состояния системы;

$\Delta t$  – промежуток времени, в течение которого оно существует.

Отличительной особенностью квантовой теории является необходимость вероятностного подхода к описанию микрочастиц. Состояние микрообъекта в квантовой механике описывают с помощью **волновой функции**, которая является основным носителем информации о его корпускулярных и волновых свойствах. Вероятность нахождения частицы в элементе объемом  $dV$  равна

$$dW = |\Psi|^2 dV. \quad (3.29)$$

Величина

$$|\Psi|^2 = \frac{dW}{dV} \quad (3.30)$$

(квадрат модуля  $\Psi$ -функции) имеет смысл плотности вероятности. Таким образом, физический смысл имеет не сама  $\Psi$ -функция, а квадрат ее модуля  $|\Psi|^2$ , которым задается интенсивность волн де Бройля.

Вероятность найти частицу в момент времени  $t$  в конечном объеме  $V$  равна

$$W = \int_V dW = \int_V |\Psi|^2 dV. \quad (3.31)$$

Условие нормировки вероятностей

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1 \quad (3.32)$$

говорит об объективном существовании частицы в пространстве.

**Основное уравнение нерелятивистской квантовой механики (общее уравнение Шредингера) имеет вид:**

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.33)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ;

$m$  – масса частицы;

$\Delta$  – оператор Лапласа ( $\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}$ );

$i$  – мнимая единица;

$U(x, y, z, t)$  – потенциальная функция частицы в силовом поле, в котором она движется;

$\Psi(x, y, z, t)$  – волновая функция частицы.

Уравнение

$$\Delta \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \Psi = 0, \quad (3.34)$$

называется **уравнением Шредингера для стационарных состояний**.

Фундаментальный принцип квантовой механики – **принцип неразличимости тождественных частиц**, согласно которому невозможно экспериментально различить тождественные частицы. Принимая во внимание физический смысл  $|\Psi|^2$ , принцип неразличимости тождественных частиц можно записать в виде

$$|\Psi(x_1, x_2)|^2 = |\Psi(x_2, x_1)|^2, \quad (3.35)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – соответственно совокупность пространственных и спиновых координат первой и второй частиц.

Из выражения (3.35) вытекает, что возможны два случая:

$$\Psi(x_1, x_2) = \pm \Psi(x_2, x_1), \quad (3.36)$$

т.е. принцип неразличимости тождественных частиц ведет к определенному свойству симметрии волновой функции. Если при перемещении частиц местами волновая функция не меняет знака, то она называется симметричной, если меняет – антисимметричной. Свойство симметрии или антисимметрии – признак данного типа микрочастиц.

Установлено, что симметрия и антисимметрия волновых функций определяются спином частиц. В зависимости от характера симметрии все элементарные частицы и построенные из них системы (атомы, молекулы) делятся на два класса. Частицы с полуцелым спином (например, электроны, протоны, нейтроны) описываются антисимметричными волновыми функциями и подчиняются статистике Ферми-Дирака; эти частицы называются **фермионами**. Частицы с нулевым или целочисленным спином (например,  $\pi$ -мезоны, фотоны) описываются симметричными волновыми функциями и подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна; эти частицы называются **бозонами**.

Паули сформулировал принцип, согласно которому системы фермионов встречаются в природе только в состояниях, описываемых антисимметричными волновыми функциями (квантово-механическая формулировка принципа Паули). Из этого положения вытекает более простая формулировка **принципа Паули**: в системе одинаковых фермионов любые два из них не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии.

На основе квантовой теории излучения были построены квантовые генераторы радиоволн и квантовые генераторы видимого света.

**Лазер** – оптический квантовый генератор, генерирующий мощный, узконаправленный, монохроматический поток излучения.

Физической основой работы лазера служит явление индуцированного излучения.

**Спонтанное излучение** – излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.

**Индукцированное (вынужденное) излучение** – излучение при переходе атома с верхнего энергетического уровня на нижний под влиянием внешнего электромагнитного поля (электромагнитной волны). При индуцированном излучении поглощается один фотон, а испускаются атомом два одинаковых фотона. Поэтому индуцированное излучение монохроматично, когерентно и обладает большей интенсивностью, чем падающее излучение.

При прохождении света через вещество происходит поглощение фотонов атомами. Атомы переходят в возбужденное состояние. Состояние вещества, в котором меньше половины атомов находится в возбужденном состоянии, называется **состоянием с нормальной населенностью** энергетических уровней. Если возбужденных атомов больше половины, то такое состояние называется **состоянием с инверсной населенностью** уровней. Здесь чаще происходит индуцированное излучение, чем поглощение, а при индуцированном излучении происходит усиление потока света.

Инверсная населенность осуществляется по трехуровневой схеме, представленной на рис. 3.3.

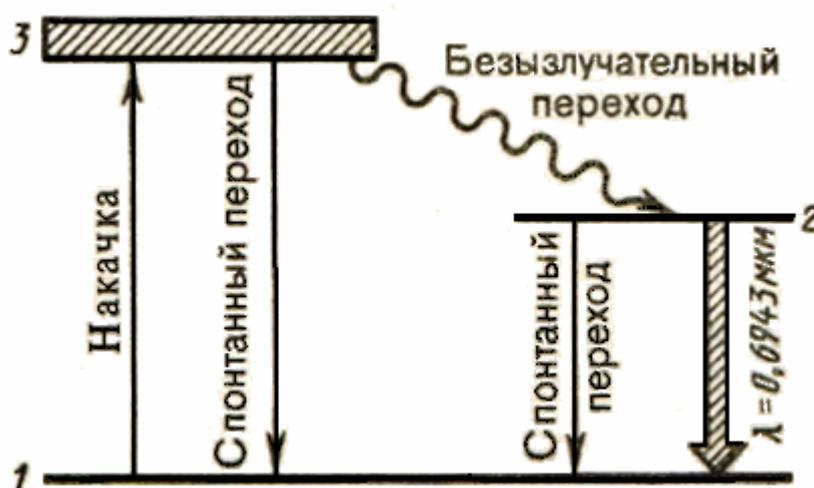


Рис. 3.3.

Под действием внешнего излучения атомы переходят с нижнего уровня 1 на уровни широкой полосы 3. Так как время жизни атомов в возбужденных состояниях мало (меньше  $10^{-7}$  с), то осуществляются либо спонтанные переходы  $3 \rightarrow 1$  (они незначительны), либо наиболее вероятные безызлучательные переходы на уровень 2 (он называется метастабильным) с передачей избытка энергии кристаллической решетке. Переход  $2 \rightarrow 1$  запрещен правилами отбора, поэтому длительность возбужденного состояния 2 около  $10^{-3}$  с, т.е. примерно на четыре порядка больше, чем для состояния 3. Это приводит к «накоплению» атомов на уровне 2. При достаточной мощности накачки возникает среда с инверсной населенностью уровня 2.

Каждый фотон, случайно возникший при спонтанных переходах, может порождать в активной среде множество вынужденных переходов  $2 \rightarrow 1$ , в результате чего появляется лавина вторичных фотонов, являющихся копиями первичных. Таким образом и зарождается лазерная генерация.

Для выделения направления лазерной генерации используется оптический резонатор.

### Примеры решения задач

1. Найдите отношение скоростей нейтрона и альфа-частицы, длины волн де Бройля которых одинаковы.

Дано:

$$m_n = 1 \text{ а.е.м.}$$

$$m_\alpha = 4 \text{ а.е.м.}$$

$$\lambda_n = \lambda_\alpha$$

---


$$\frac{v_n}{v_\alpha} = ?$$

Решение:

Согласно формуле де Бройля

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

где  $p = mv$  – импульс частицы. Тогда длина волны де Бройля будет равна

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

Из последнего соотношения выразим скорость частицы:

$$v = \frac{h}{\lambda m}.$$

Следовательно, скорости нейтрона и альфа-частицы будут соответственно равны:

$$v_n = \frac{h}{\lambda_n m_n} \text{ и } v_\alpha = \frac{h}{\lambda_\alpha m_\alpha}.$$

Найдем отношение скоростей частиц:

$$\frac{v_n}{v_\alpha} = \frac{\lambda_\alpha m_\alpha}{\lambda_n m_n}.$$

По условию  $\lambda_n = \lambda_\alpha$ , поэтому  $\frac{v_n}{v_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_n}$ .

Подставим численные значения:

$$\frac{v_n}{v_\alpha} = \frac{4}{1} = 4.$$

Ответ: 4.

2. Масса движущегося электрона в три раза больше его массы покоя. Чему равна минимальная неопределенность координаты электрона?

Дано:

$$m = 3m_0$$

$$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\Delta x_{\min} - ?$$

Решение:

Согласно соотношению неопределенности Гейзенберга

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

где  $\Delta x$  и  $\Delta p_x$  – неопределенности координаты и импульса частицы;  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  – приведенная постоянная Планка.

Учитывая, что

$$p = mv,$$

где  $m$  – масса;

$v$  – скорость частицы, соотношение неопределенности можно представить в виде:

$$\Delta x \geq \frac{h}{2\pi m \Delta v_x}.$$

Поскольку неопределенность скорости  $\Delta v_x$ , как и сама скорость, не может превышать скорость света  $c$  в вакууме, то

$$\Delta x_{\min} = \frac{h}{2\pi mc}.$$

Подставив условие  $m = 3m_0$ , получим:

$$\Delta x_{\min} = \frac{h}{6\pi m_0 c}.$$

Проводя вычисления, найдем

$$\Delta x_{\min} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{6 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,29 \cdot 10^{-13} \text{ (м)}.$$

Ответ:  $1,29 \cdot 10^{-13}$  м.

3. Чему равна вероятность обнаружить электрон в одномерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками в интервале от  $\frac{5L}{8}$  до  $L$  в состоянии с главным квантовым числом  $n = 4$ ?

Дано:

$$\frac{5L}{8} < x < L$$

$$n = 4$$

$$W = ?$$

Решение:

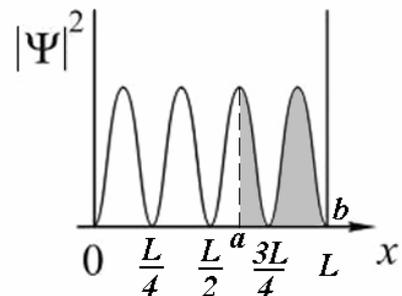
Вероятность обнаружить частицу в элементе  $dl$  определяется по формуле

$$W = \int_a^b |\Psi|^2 dl,$$

где  $|\Psi|^2$  – квадрат модуля волновой функции;

$a$  и  $b$  – границы интервала.

Вероятность можно определить графически, исходя из физического смысла определенного интеграла: вероятность численно равна площади фигуры под графиком квадрата волновой функции. Построим график квадрата волновой функции для состояния с главным квантовым числом  $n = 4$ .



Учитывая, что вся площадь фигуры под графиком  $|\Psi|^2$  равна единице, найдем вероятность как отношение площади закрашенного участка к общей площади фигуры:

$$W = \frac{S_{ab}}{S_{\text{общ}}} = \frac{3}{8}.$$

Ответ:  $\frac{3}{8}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**3.1.** Масса движущегося электрона в три раза больше его массы покоя. Вычислите дебройлевскую длину волны электрона.

**3.2.** Каков импульс фотона ультрафиолетового излучения с длиной волны 100 нм?

**3.3.** Каков импульс фотона, энергия которого равна 3 эВ?

**3.4.** Чему равен импульс, который передает фотон излучения с длиной волны  $6,6 \cdot 10^{-7}$  м телу, полностью поглощающему свет?

**3.5.** Найдите импульс фотона с энергией 5 эВ.

**3.6.** Длина волны, излучаемой первым источником  $\lambda_1 = 3,75 \cdot 10^{-7}$  м, вторым –  $\lambda_2 = 7,5 \cdot 10^{-7}$  м. Чему равно отношение импульсов  $\frac{p_1}{p_2}$  фотонов, излучаемых первым и вторым источниками?

**3.7.** Модуль импульса фотона в первом пучке света в 2 раза больше модуля импульса фотона во втором пучке. Чему равно отношение длины волны в первом пучке света к длине волны во втором пучке?

**3.8.** Модуль импульса фотона в первом пучке света в 2 раза больше, чем во втором пучке. Определите отношение периода колебаний электрического поля в первом пучке света к периоду колебаний этого поля во втором пучке.

**3.9.** Энергия фотона в первом пучке света в 2 раза больше энергии фотона во втором пучке. Определите отношение модуля импульса фотона в первом пучке света к модулю импульса во втором пучке.

**3.10.** Как называется частица, которая, двигаясь со скоростью 1400 м/с, имеет такой же импульс, как фотон светового излучения с длиной волны 520 нм?

**3.11.** Два электрона движутся со скоростями  $v$  и  $2v$ . Во сколько раз отличаются длины волн де Бройля  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , соответствующие первому и второму электрону?

**3.12.** Как изменится длина волны де Бройля при возрастании и массы, и скорости нерелятивистской частицы в 2 раза?

**3.13.** Чему равна длина волны де Бройля для частицы, обладающей импульсом  $100 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ?

**3.14.** Пучок электронов, пройдя через узкую щель, создает такую же дифракционную картину, как и монохроматическое излучение с длиной волны 55 нм. Чему равна скорость электронов в пучке?

**3.15.** Чему равен импульс, полученный атомом при поглощении фотона из светового пучка с частотой  $1,5 \cdot 10^{14}$  Гц?

**3.16.** Атом испустил фотон с энергией  $6 \cdot 10^{-18}$  Дж. Какой импульс приобрел атом?

**3.17.** Определите длину волны де Бройля, соответствующей средней квадратичной скорости молекул водорода при комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ).

**3.18.** Определите массу фотона, если его длина волны 22 нм.

**3.19.** Нейтрон и альфа-частица имеют одинаковые скорости. Найдите отношение длины волны де Бройля нейтрона к длине волны альфа-частицы.

**3.20.** Молекула водорода, позитрон, протон и альфа-частица имеют одинаковую длину волны де Бройля. Какая частица имеет наименьшую скорость?

**3.21.** Чему равно отношение скоростей протона и нейтрона, если их длины волн де Бройля одинаковы?

**3.22.** Найдите отношение длин волн де Бройля протона и альфа-частицы, если они движутся с одинаковыми скоростями.

**3.23.** Отношение скоростей двух микрочастиц  $\frac{v_1}{v_2} = 8$ . Чему равно отношение масс этих частиц  $\frac{m_1}{m_2}$ , если их длины волн де Бройля удовлетворяют соотношению  $\lambda_2 = 2\lambda_1$ ?

**3.24.** Отношение скоростей двух микрочастиц  $\frac{v_1}{v_2} = 4$ . Чему равно отношение масс этих частиц  $\frac{m_1}{m_2}$ , если их длины волн де Бройля удовлетворяют соотношению  $\lambda_2 = 4\lambda_1$ ?

**3.25.** Отношение скоростей двух микрочастиц  $\frac{v_1}{v_2} = 6$ . Чему равно отношение масс этих частиц  $\frac{m_1}{m_2}$ , если их длины волн де Бройля удовлетворяют соотношению  $\lambda_2 = 4\lambda_1$ ?

**3.26.** Позитрон, протон, нейтрон и альфа-частица имеют одинаковую длину волны де Бройля. Какая частица обладает наименьшей скоростью?

**3.27.** Электрон, протон, нейтрон и альфа-частица движутся с одинаковой скоростью. Сравните их длины волн де Бройля.

**3.28.** Протон и дейтрон движутся с одинаковыми скоростями. Во сколько раз отличаются их длины волн де Бройля?

**3.29.** Определите массу фотона, если его длина волны 220 нм.

**3.30.** Определите массу фотона, если его длина волны 400 нм.

**3.31.** Среднее расстояние электрона от ядра в невозбужденном атоме водорода равно 52,9 пм. Вычислите минимальную неопределенность скорости электрона в атоме.

**3.32.** Электрон локализован в пространстве в пределах  $\Delta x = 2,5$  мкм. Найдите наименьшее значение неопределенности скорости  $\Delta v_x$  (в м/с).

**3.33.** Координату объекта массой  $2 \cdot 10^{-9}$  кг можно установить с неопределенностью 0,15 мкм. Найдите наименьшее значение неопределенности скорости (в м/с).

**3.34.** Найдите отношение неопределенностей проекций скоростей нейтрона и дейтрона на некоторое направление при условии, что соответствующие координаты частиц определены с одинаковой точностью.

**3.35.** Положение бусинки массой 1 г и протона ( $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг) определены с одинаковой погрешностью  $10^{-7}$  м. Квантово-механическая неопределенность  $x$ -компоненты скорости бусинки составляет примерно  $10^{-24}$  м/с. Какова неопределенность  $x$ -компоненты скорости электрона?

**3.36.** Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии  $\approx 10^{-3}$  с. Учитывая, что постоянная Планка  $\hbar = 6,6 \cdot 10^{-16}$  эВ·с, найдите ширину метастабильного уровня (в эВ).

**3.37.** Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии  $\approx 10^{-3}$  с. Учитывая, что постоянная Планка  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, найдите ширину метастабильного уровня (в эВ).

**3.38.** Среднее время жизни  $\pi^0$ -мезона равно  $1,9 \cdot 10^{-16}$  с. Какова наименьшая энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать  $\pi^0$ -мезон? Ответ выразите в Дж.

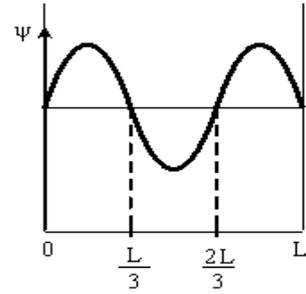
**3.39.** Протон локализован в пространстве в пределах 2,0 мкм. Найдите наименьшее значение неопределенности скорости (в м/с).

**3.40.** Нейтрон локализован в пространстве в пределах 0,5 мкм. Найдите наименьшее значение неопределенности скорости (в м/с).

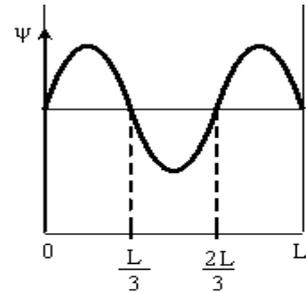
**3.41.** Время жизни атома в возбужденном состоянии 10 нс. Найдите минимальную ширину энергетического уровня в эВ, учитывая, что постоянная Планка  $\hbar = 6,6 \cdot 10^{-16}$  эВ·с.

**3.42.** Ширина следа электрона на фотографии, полученной с использованием камеры Вильсона, составляет 1 мм. Какова минимальная неопределенность скорости электрона?

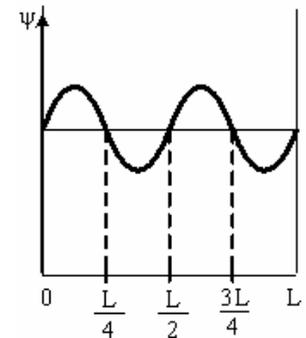
**3.43.**  $\Psi$ -функция имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $\frac{L}{6} < x < \frac{5L}{6}$ ?



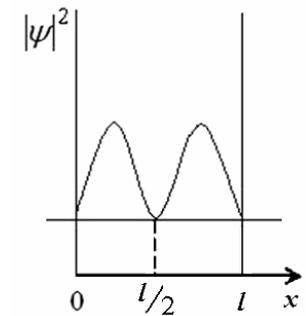
**3.44.**  $\Psi$ -функция имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $\frac{L}{6} < x < L$ ?



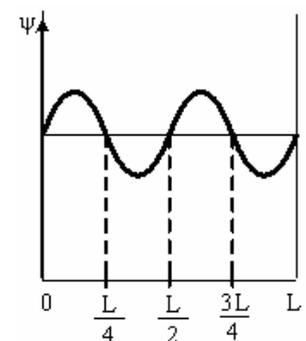
**3.45.**  $\Psi$ -функция имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $\frac{3L}{8} < x < L$ ?



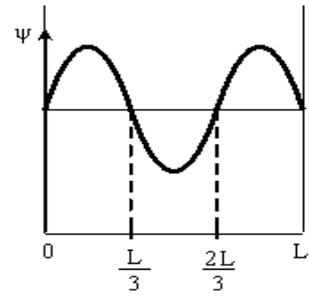
**3.46.** На рисунке изображена плотность вероятности обнаружения микрочастицы на различных расстояниях от «стенок» ямы. Какова вероятность ее обнаружить на участке  $\frac{L}{4} < x < \frac{3L}{4}$ ?



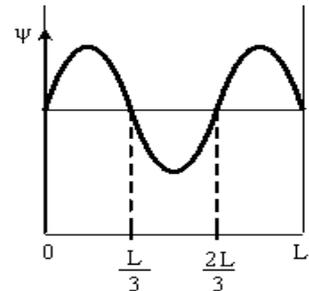
**3.47.** Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками в состоянии с квантовым числом  $n=4$ .  $\Psi$ -функция электрона в этом состоянии имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $\frac{L}{8} < x < \frac{L}{2}$ ?



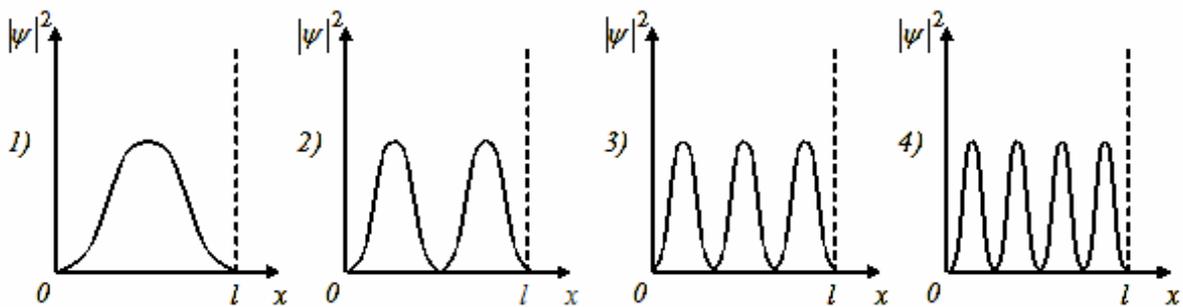
**3.48.** Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками в состоянии с квантовым числом  $n=3$ .  $\Psi$ -функция электрона в этом состоянии имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $\frac{L}{6} < x < \frac{5L}{6}$ ?



**3.49.**  $\Psi$ -функция электрона в одномерном потенциальном ящике шириной  $L$  имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $\frac{L}{6} < x < \frac{L}{2}$ ?

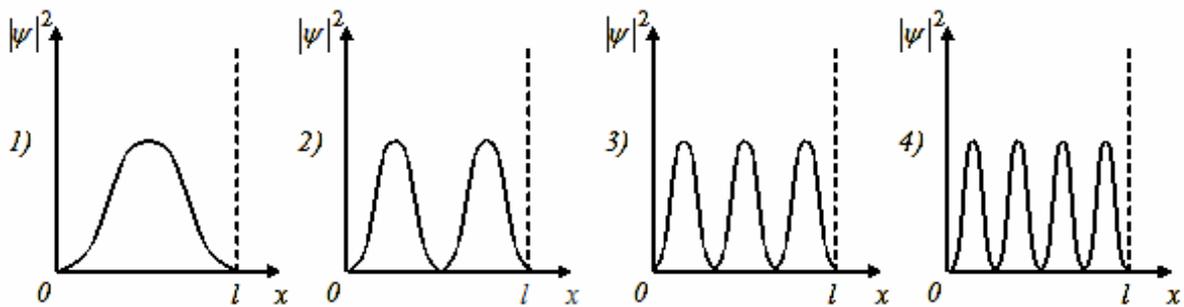


**3.50.** На рисунках схематически представлены графики распределения плотности вероятности обнаружения электрона по ширине одномерного потенциального ящика с бесконечно высокими стенками для состояний с различными значениями главного квантового числа  $n$ . Чему равна вероятность обнаружить электрон в интервале от  $\frac{3L}{8}$  до  $L$  в состоянии с  $n=4$ ?



**3.51.** На рисунках схематически представлены графики распределения плотности вероятности обнаружения электрона по ширине одномерного потенциального ящика с бесконечно высокими стенками для состояний с различными значениями главного квантового числа  $n$ . Чему равно отношение вероятности обнаружить электрон на первом энергетическом

уровне в левой половине ящика к вероятности обнаружить электрон на четвертом энергетическом уровне в интервале от  $\frac{L}{4}$  до  $\frac{L}{2}$ ?

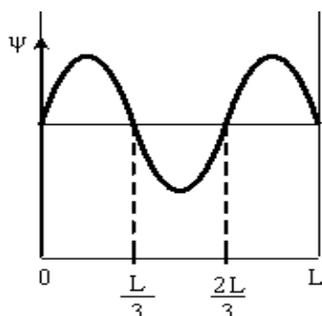


**3.52.** Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  на втором энергетическом уровне. Определите вероятность обнаружения частицы в пределах от 0 до  $\frac{3l}{4}$ .

**3.53.** Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  на третьем энергетическом уровне. Определите отношение вероятностей нахождения частицы в пределах от 0 до  $\frac{l}{3}$  и от  $\frac{l}{3}$  до  $\frac{2l}{3}$ .

**3.54.** Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$ . Вычислите отношение вероятностей нахождения частицы в пределах от 0 до  $\frac{l}{2}$  для первого и от 0 до  $\frac{l}{4}$  второго энергетических уровней.

**3.55.**  $\Psi$ -функция имеет вид, указанный на рисунке. Какова вероятность обнаружить электрон на участке  $0 < x < \frac{2L}{3}$ ?



**3.56.** Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  на третьем энергетическом уровне. Определите вероятность нахождения частицы в пределах от 0 до  $\frac{l}{6}$ .

**3.57.** Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  в основном состоянии. Определите вероятность нахождения частицы в пределах от  $\frac{l}{2}$  до  $l$ .

**3.58.** Чему равна вероятность обнаружить электрон в интервале от  $\frac{5L}{8}$  до  $L$  в состоянии с  $n = 4$ ?

**3.59.** Чему равна вероятность обнаружить электрон в интервале от  $\frac{3L}{8}$  до  $\frac{7L}{8}$  в состоянии с  $n = 4$ ?

**3.60.** Чему равна вероятность обнаружить электрон в интервале от  $\frac{L}{2}$  до  $\frac{3L}{4}$  в состоянии с  $n = 2$ ?

**3.61.** При переходе электрона с некоторой орбиты на вторую атом водорода испускает свет длиной волны  $4,34 \cdot 10^{-7}$  м. Найдите номер неизвестной орбиты.

**3.62.** Найдите значение постоянной Ридберга, если известно, что при переходе атома водорода из четвертого энергетического состояния во второе излучается фотон, соответствующий зеленой линии в спектре водорода с длиной волны 486,13 нм.

**3.63.** Во сколько раз длина волны излучения атома водорода при переходе из третьего энергетического состояния во второе больше длины волны излучения, обусловленного переходом из второго состояния в первое?

**3.64.** Найдите отношение минимальной энергии фотона в серии Лаймана к минимальной энергии фотона в серии Бальмера.

**3.65.** Чему равно отношение максимальной частоты линии серии Пашена к минимальной частоте линии серии Бальмера?

**3.66.** Чему равна наибольшая длина волны спектральной линии (в нм) серии Лаймана?

**3.67.** Чему равно отношение минимальной частоты линии серии Лаймана к максимальной частоте линии серии Бальмера?

**3.68.** Определите длину волны света, испускаемого атомом водорода при его переходе из стационарного состояния с энергией  $E_3 = -1,5$  эВ в состояние с энергией  $E_2 = -3,37$  эВ.

**3.69.** Сколько линий спектра атома водорода попадает в видимую область ( $\lambda = 0,40-0,76$  мкм)? Вычислить длины волн этих линий. Каким цветам они соответствуют?

**3.70.** Определите максимальную и минимальную энергию фотона в видимой серии спектра водорода (серии Бальмера).

**3.71.** Определите длину волны света, испускаемого атомом водорода при его переходе из состояния с энергией  $E_4$  в состояние с энергией  $E_2$ .

**3.72.** При переходе электрона в водородоподобном атоме с одной из возможных орбит на другую, более близкую к ядру, энергия атома уменьшается на 1,892 эВ. Определите длину волны излучения.

**3.73.** Найдите момент импульса электрона на первой боровской орбите.

**3.74.** Найдите отношение моментов импульса электрона для второй и первой боровских орбит.

**3.75.** Найдите отношение моментов импульса электрона для третьей и второй боровских орбит.

**3.76.** Чему равен импульс электрона, находящегося на четвертой боровской орбите?

**3.77.** Электрон перешел с третьей орбиты на вторую. Найдите изменение скорости электрона.

**3.78.** Найдите энергию электрона на первой боровской орбите в атоме водорода.

**3.79.** Найдите энергию электрона на второй боровской орбите в атоме водорода.

**3.80.** Найдите энергию электрона на третьей боровской орбите в атоме водорода.

**3.81.** Чему равен импульс электрона, находящегося на второй боровской орбите?

**3.82.** Чему равен импульс электрона, находящегося на первой боровской орбите?

**3.83.** Как и во сколько раз изменяется скорость электрона при переходе с первой орбиты на вторую?

**3.84.** На какой орбите скорость электрона в атоме водорода равна 734 км/с?

**3.85.** Каково ускорение электрона на первой боровской орбите в атоме водорода?

**3.86.** Каково ускорение электрона на второй боровской орбите в атоме водорода?

**3.87.** Каково ускорение электрона на третьей боровской орбите в атоме водорода?

**3.88.** Найдите скорость электрона на третьей боровской орбите в атоме водорода.

**3.89.** Найдите скорость электрона на первой боровской орбите в атоме водорода.

**3.90.** Найдите скорость электрона на второй боровской орбите в атоме водорода.

## Варианты задач для домашней контрольной работы

Вариант	Номера задач		
1	3.1	3.31	3.61
2	3.2	3.32	3.62
3	3.3	3.33	3.63
4	3.4	3.34	3.64
5	3.5	3.35	3.65
6	3.6	3.36	3.66
7	3.7	3.37	3.67
8	3.8	3.38	3.68
9	3.9	3.39	3.69
10	3.10	3.40	3.70
11	3.11	3.41	3.71
12	3.12	3.42	3.72
13	3.13	3.43	3.73
14	3.14	3.44	3.74
15	3.15	3.45	3.75
16	3.16	3.46	3.76
17	3.17	3.47	3.77
18	3.18	3.48	3.78
19	3.19	3.49	3.79
20	3.20	3.50	3.80
21	3.21	3.51	3.81
22	3.22	3.52	3.82
23	3.23	3.53	3.83
24	3.24	3.54	3.84
25	3.25	3.55	3.85
26	3.26	3.56	3.86
27	3.27	3.57	3.87
28	3.28	3.58	3.88
29	3.29	3.59	3.89
30	3.30	3.60	3.90

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задач является необходимой составной частью процесса изучения физики студентами ПГУАС. Усвоение теоретического материала по физике осуществляется глубже и прочнее в процессе решения задач, т.к. в ходе разрешения задачных ситуаций появляется необходимость использования тех или иных теоретических знаний.

Самостоятельная работа студентов является необходимым компонентом процесса обучения и может быть определена как творческая деятельность студентов, направленная на приобретение ими новых знаний и навыков.

Таким образом, самостоятельное решение предложенных задач позволяет глубже изучить вопросы разделов «Оптика», «Квантовая механика», способствует усвоению и закреплению в памяти студентов основных теоретических положений и сущности законов по указанным разделам физики; формированию практических умений и навыков применения теории в процессе решения задач. Кроме того, данный вид самостоятельной работы развивает умение учиться, формирует у студента способности к саморазвитию, творческому применению полученных знаний.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2014.
2. Детлаф, А.А. Курс физики [Текст] / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2006.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]: в 3 т. Т. 3. Оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. – М.: Наука, 2007.
4. Ландсберг, Г.С. Элементарный учебник физики [Текст]: в 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика / Г.С. Ландсберг. – М.: Физматлит, 2012.
5. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями [Текст]: учеб. пособие / Т.И. Трофимова, З.Г. Павлова. – М.: Высшая школа, 2007.
6. Сивухин, Д.В. Сборник задач по общему курсу физики [Текст]: в 5 т. Т. 4. Оптика / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит; Лань, 2006.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ**

Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$
Первая постоянная Вина	$b_1 = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Вторая постоянная Вина	$b_2 = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$
Постоянная Ридберга	$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$
Комптоновская длина волны	$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Атомная единица массы	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Энергия, соответствующая 1 а.е.м.	931,50 МэВ

**2. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ  
ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ  
И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЙ**

Множитель	Приставка		Пример	
	Наименование	Обозначение		
$10^{18}$	экса	Э	эксаметр	Эм
$10^{15}$	пета	П	петагерц	ПГц
$10^{12}$	тера	Т	тераджоуль	ТДж
$10^9$	гига	Г	гигапаскаль	ГПа
$10^6$	мега	М	меганьютон	МН
$10^3$	кило	к	километр	км
$10^2$	гекто	г	гектоватт	гВт
$10^1$	дека	да	декалитр	дал
$10^{-1}$	деци	д	дециметр	дм
$10^{-2}$	санти	с	сантиметр	см
$10^{-3}$	милли	м	милливольт	мВ
$10^{-6}$	микро	мк	микроампер	мкА
$10^{-9}$	нано	н	наносекунда	нс
$10^{-12}$	пико	п	пикофарад	пФ
$10^{-15}$	фемто	ф	фемтограмм	фг
$10^{-18}$	атто	а	аттокулон	аКл

**3. ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

<b>Вещество</b>	<i>n</i>	<b>Вещество</b>	<i>n</i>
Ацетон	1,36	Органическое стекло	1,50
Алмаз	2,42	Рубин	1,76
Бензин	1,41	Серная кислота	1,43
Бензол	1,50	Сероуглерод	1,63
Вода	1,33	Скипидар	1,47
Глицерин	1,47	Слюда	1,58
Касторовое масло	1,48	Спирт	1,36
Каменная соль	1,54	Стекло (обычное)	1,48...1,53
Кварц	1,54	Стекло (оптическое)	1,47...2,04
Корунд	1,77	Эфир	1,35
Лед	1,31		

**4. РАБОТА ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА**

<b>Металл</b>	<b><math>A</math>, эВ</b>	<b>Металл</b>	<b><math>A</math>, эВ</b>
Алюминий	3,7	Платина	6,3
Литий	2,3	Серебро	4,7
Натрий	2,5	Цинк	4,0
Вольфрам	4,5	Цезий	1,8
Никель	4,8	Медь	4,4
Калий	2,2	Рубидий	2,16

**5. МАССА  $m_0$  И ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ  $E_0$  НЕКОТОРЫХ**

**ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ ЛЕГКИХ ЯДЕР**

Частицы	$m_0$		$E_0$	
	$10^{-27}$ кг	а.е.м.	$10^{-27}$ кг	а.е.м.
Альфа-частица	6,64	4,00149	5,96	3733
Дейтрон	3,35	2,01355	3,00	1876
Нейтрон	1,675	1,00867	1,51	939
Протон	1,672	1,00728	1,50	938
Электрон	0,000911	0,00055	0,000816	0,511

Продолжение приложения

Таблицы значений синусов и тангенсов для углов от 0° до 90°

Гра- дусы	Синусы	Тан- генсы	Гра- дусы	Синусы	Тан- генсы	Гра- дусы	Синусы	Тан- генсы
<b>0</b>	0,0000	0,0000	<b>31</b>	0,5150	0,6009	<b>61</b>	0,8746	1,804
<b>1</b>	0,0175	0,0175	<b>32</b>	0,5299	0,6249	<b>62</b>	0,8829	1,881
<b>2</b>	0,0349	0,0349	<b>33</b>	0,5446	0,6494	<b>63</b>	0,8910	1,963
<b>3</b>	0,0523	0,0524	<b>34</b>	0,5592	0,6745	<b>64</b>	0,8988	2,050
<b>4</b>	0,0698	0,0699	<b>35</b>	0,5736	0,7002	<b>65</b>	0,9063	2,145
<b>5</b>	0,0872	0,0875	<b>36</b>	0,5878	0,7265	<b>66</b>	0,9135	2,246
<b>6</b>	0,1045	0,1051	<b>37</b>	0,6018	0,7536	<b>67</b>	0,9205	2,356
<b>7</b>	0,1219	0,1228	<b>38</b>	0,6157	0,7813	<b>68</b>	0,9272	2,475
<b>8</b>	0,1392	0,1405	<b>39</b>	0,6293	0,8098	<b>69</b>	0,9336	2,605
<b>9</b>	0,1564	0,1584	<b>40</b>	0,6428	0,8391	<b>70</b>	0,9397	2,747
<b>10</b>	0,1736	0,1763	<b>41</b>	0,6561	0,8693	<b>71</b>	0,9455	2,904
<b>11</b>	0,1908	0,1944	<b>42</b>	0,6691	0,9004	<b>72</b>	0,9511	3,078
<b>12</b>	0,2079	0,2126	<b>43</b>	0,6820	0,9325	<b>73</b>	0,9563	3,271
<b>13</b>	0,2250	0,2309	<b>44</b>	0,6947	0,9657	<b>74</b>	0,9613	3,487
<b>14</b>	0,2419	0,2493	<b>45</b>	0,7071	1,0000	<b>75</b>	0,9659	3,732
<b>15</b>	0,2588	0,2679	<b>46</b>	0,7193	1,039	<b>76</b>	0,9703	4,011
<b>16</b>	0,2756	0,2867	<b>47</b>	0,7314	1,072	<b>77</b>	0,9744	4,331
<b>17</b>	0,2924	0,3057	<b>48</b>	0,7431	1,111	<b>78</b>	0,9781	4,705
<b>18</b>	0,3090	0,3249	<b>49</b>	0,7547	1,150	<b>79</b>	0,9816	5,145
<b>19</b>	0,3256	0,3443	<b>50</b>	0,7660	1,162	<b>80</b>	0,9848	5,671
<b>20</b>	0,3420	0,3640	<b>51</b>	0,7771	1,235	<b>81</b>	0,9877	6,314
<b>21</b>	0,3584	0,3839	<b>52</b>	0,7880	1,280	<b>82</b>	0,9903	7,115
<b>22</b>	0,3746	0,4040	<b>53</b>	0,7986	1,327	<b>83</b>	0,9925	8,114
<b>23</b>	0,3907	0,4245	<b>54</b>	0,8090	1,376	<b>84</b>	0,9945	9,514
<b>24</b>	0,4067	0,4452	<b>55</b>	0,8192	1,428	<b>85</b>	0,9962	11,43
<b>25</b>	0,4226	0,4663	<b>56</b>	0,8290	1,483	<b>86</b>	0,9976	14,30
<b>26</b>	0,4384	0,4877	<b>57</b>	0,8387	1,540	<b>87</b>	0,9986	19,08
<b>27</b>	0,4540	0,5095	<b>58</b>	0,8480	1,600	<b>88</b>	0,9994	28,64
<b>28</b>	0,4695	0,5317	<b>59</b>	0,8572	1,664	<b>89</b>	0,9998	57,29
<b>29</b>	0,4848	0,5643	<b>60</b>	0,8660	1,732	<b>90</b>	1,0000	∞
<b>30</b>	0,5000	0,5774						

Продолжение приложения  
 Обозначения физических величин и их единицы измерения  
 в Международной системе

Обозначение величины	Наименование величины	Единица измерения
$l, S$	длина, расстояние, путь	м
$r, R$	радиус	м
$t$	время	с
$\phi, \alpha$	телесный угол	рад
$\vec{v}$	скорость тела (частицы)	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
$\vec{p}$	импульс тела (частицы)	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$
$m$	масса тела (частицы)	кг
$\vec{F}$	сила	Н
$E$	энергия	Дж
$A$	работа	Дж
$q$	электрический заряд	Кл
$T$	термодинамическая температура	К
$\nu$	частота	Гц
$U$	электрическое напряжение	В
$\Delta\phi$	разность фаз	рад
$\lambda$	длина волны	м
$c$	скорость света в вакууме	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
$I$	интенсивность света	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
$d$	период (постоянная) дифракционной решетки	м
$n$	абсолютный показатель преломления среды	безразмерная величина
$\Phi_e$	поток (мощность) излучения	Вт
$M_e$	энергетическая светимость	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
$M_{e,\lambda}$	спектральная плотность энергетической светимости	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$
$p$	давление	Па
$\vec{L}$	момент импульса тела (частицы)	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$

***Методические указания к решению задач***

При решении задач рекомендуется руководствоваться следующими правилами.

1. Прежде всего, нужно хорошо вникнуть в условие задачи, установить какие физические явления и закономерности лежат в ее основе. Анализируя условие задачи, следует ясно себе представить, какие из описанных в нем процессов являются главными, а какими можно пренебречь. Надо выяснить, какие упрощающие предположения можно внести, чтобы решить задачу. Принятые упрощающие допущения отмечают при анализе содержания задачи.

Приступая к решению задачи, надо также выяснить, какие дополнительные сведения нужно взять из таблиц.

Если позволяет характер задачи, обязательно надо сделать рисунок, поясняющий ее сущность.

2. За редкими исключениями, каждая задача должна быть сначала решена в общем виде (т.е. в буквенных обозначениях, а не в числах), причем искомая величина должна быть выражена через заданные величины. Получив решение в общем виде, нужно проверить, правильную ли оно имеет размерность. Если это возможно, необходимо исследовать поведение решения в предельных случаях.

В тех случаях, когда в процессе нахождения искомых величин приходится решать систему нескольких громоздких уравнений целесообразно сначала подставить в эти уравнения численные значения коэффициентов и лишь затем определять значения искомых величин.

3. Убедившись в правильности общего решения, подставляют в него вместо каждой из букв численные значения обозначенных ими величин, беря все эти значения в одной и той же системе единиц. Наряду с единицами Международной системы на практике и в литературе распространены единицы других систем, а также внесистемные единицы. Поэтому в условиях задач численные данные приведены не всегда в единицах СИ. Для решения задач в СИ все данные, приведенные в условиях задач, а также взятые из справочных таблиц, должны быть переведены в единицы СИ. При этом и ответ, естественно, получится в единицах этой же системы.

## Продолжение приложения

Иногда нет необходимости все данные выражать в одной и той же системе. Так, например, если в формуле какая-либо величина входит множителем и в числитель и в знаменатель, то очевидно безразлично в каких единицах выражать эту величину, необходимо только, чтобы единицы были одинаковы.

4. Чтобы облегчить определение порядка вычисляемой величины полезно представить исходные величины в виде чисел близких к единице, умноженных на 10 в соответствующей степени (например, вместо 247 подставить  $2,47 \cdot 10^2$ , вместо 0,086 – число  $0,86 \cdot 10^{-1}$  и т.д.). Произведя подстановку численных значений, можно приступить к вычислениям. Рекомендуемый порядок работы, во-первых, предотвратит много ошибок, а во-вторых, в случае надобности облегчит выяснение вопроса о том, на каком этапе – при подстановке численных значений величин или в процессе вычислений – вкралась ошибка.

5. Надо помнить, что численные значения физических величин всегда являются приближенными. Поэтому при расчетах необходимо руководствоваться правилами действий с приближенными числами. При получении численного ответа нужно обращать внимание на степень точности окончательного результата. Точность ответа не должна превышать точности, с которой даны исходные величины.

У численного ответа сразу же, как только вместо буквенных обозначений подставляются числа, нужно писать наименование.

В тех задачах, где требуется начертить график, следует выбрать масштаб и начало координат.

6. Получив численный ответ, нужно оценить его правдоподобность. Такая оценка может в ряде случаев обнаружить ошибочность полученного результата. Например, скорость частицы не может быть больше  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (скорости света в вакууме), дальность полета брошенного человеком камня не может быть больше порядка 1000 м, масса молекулы – порядка 1 мг и т.п.

### ***О приближенных вычислениях***

Числовые значения величин, которыми приходится оперировать при решении физических задач, являются большей частью приближенными. Поэтому при вычислениях нужно придерживаться следующих правил:

1. Достаточно производить вычисления с числами, содержащими не более знаков, чем в исходных данных, так как с помощью вычислений невозможно получить результат более точный, чем исходные данные.

2. При сложении или вычитании чисел, имеющих различную точность, более точное должно быть округлено до точности менее точного.

*Например:*  $9,6 + 0,176 = 9,6 + 0,2 = 9,8$ ;  $100,8 - 0,35 = 100,8 - 0,4 = 100,4$ .

3. При умножении (делении) следует округлять сомножители так, чтобы каждый из них содержал столько значащих цифр, сколько их имеет сомножитель с наименьшим числом значащих цифр.

*Например:*  $342 \cdot 378 = 129 \cdot 10^3$ , но не 129276 и не 129300;

$$0,148 \cdot 0,183 = 7,65 \cdot 10^{-3}, \text{ но не } 0,0076494;$$

$$\frac{0,350}{3} = 0,117, \text{ но не } 0,11667.$$

4. При извлечении корня  $n$  – степени, результат должен иметь столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное выражение.

*Например:*  $\sqrt[3]{1,33 \cdot 10^{-27}} = 1,10 \cdot 10^{-3}$ .

5. При вычислении сложных выражений соблюдаются правила в зависимости от вида производимых действий.

6. Когда число мало отличается от единицы, можно пользоваться приближенными формулами.

Если  $a, b, c$  - малы по сравнению с единицей (меньше 0,05), то:

$$1) (1 \pm a) \cdot (1 \pm b) \cdot (1 \pm c) = 1 \pm a \pm b \pm c$$

$$2) \sqrt{1 \pm a} = 1 \pm \frac{a}{2}$$

$$3) (1 \pm a)^n = 1 \pm na$$

## Окончание приложения

$$4) \frac{1}{(1 \pm a)^n} = 1 \pm an$$

$$5) \frac{1}{(1 \pm a)} = 1 \pm a$$

$$6) \ln(1 \pm a) = \pm a - \frac{a^2}{2}.$$

7. Если угол  $\alpha < 10^\circ$ , то  $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \alpha$  (в радианах).

Соблюдая эти правила, можно сэкономить время на вычисление искомых величин при решении физических задач.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ .....	5
1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.....	6
Примеры решения задач .....	12
Задачи для самостоятельного решения .....	15
Варианты задач для домашней контрольной работы .....	28
2. КВАНТОВАЯ ОПТИКА .....	29
Законы теплового излучения.....	32
Примеры решения задач .....	35
Задачи для самостоятельного решения .....	37
Варианты задач для домашней контрольной работы .....	47
3. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА.....	48
Примеры решения задач .....	59
Задачи для самостоятельного решения.....	62
Варианты задач для домашней контрольной работы .....	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	75

Учебное издание

Очкина Наталья Александровна

Сидякина Зоя Александровна

Шмарова Татьяна Сергеевна

**ФИЗИКА. ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА  
ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.И. Грейсуха

Р е д а к т о р      Н.Ю. Шалимова

В е р с т к а        Н.А. Сазонова

---

Подписано в печать 9.12.2014. Формат 60×84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл. печ. л. 5,1. Уч.-изд. л. 5,5. Тираж 80 экз.

Заказ №8.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.