

ФИЗИКА

Методические указания
к выполнению контрольной работы № 2
для студентов заочной формы обучения
(специальности 351100, 260202 и 260501)

УДК 53(07)
Ф 503

Составители: *Л.М. Родникова, В.Б. Уткин,
Н.В. Чичерина, А.А. Штыгашев*

Рецензент: *В.В. Христофоров*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

ФИЗИКА

**Методические указания
к выполнению контрольной работы № 2**

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.М. Шуваева*

Подписано в печать 29.05.2008. Формат 60 х 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 200 экз. Уч.-изд. л. 2,55. Печ. л. 2,75. Изд. № 339. Заказ №
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

© Новосибирский государственный
технический университет, 2008

Во втором семестре студенты-заочники изучают следующие разделы физики: электромагнетизм, механические колебания, электромагнитные колебания и волны, волновая оптика, квантовая оптика, элементы квантовой механики.

1. ФОРМА РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. Систематическая самостоятельная работа с учебными пособиями, конспектами лекций, задачками.
2. Посещение и конспектирование установочных и обзорных лекций, посещение консультаций.
3. Выполнение лабораторных работ (во время экзаменационной сессии).
4. Выполнение контрольных работ (одна за семестр). Вариант контрольной работы определяется последней цифрой шифра студента, а номера задач – по таблице вариантов.

2. ФОРМА КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СТУДЕНТА

1. Получение зачета за выполнение лабораторных работ.
2. Защита контрольной работы (в межсессионный период и во время сессии).
3. Сдача экзамена.

3. ВОПРОСЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЭКЗАМЕН ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»

1. Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Силовые линии магнитного поля.
2. Сила Лоренца.

3. Закон Ампера.
4. Закон Био—Савара—Лапласа для элемента тока.
5. Магнитное поле прямолинейного и кругового тока.
6. Магнитное поле соленоида.
7. Магнитный поток. Работа по перемещению контура с током в магнитном поле.
8. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.
9. Явление электромагнитной индукции.
10. Самоиндукция. Индуктивность. Взаимная индукция.
11. Энергия магнитного поля.

4. ВОПРОСЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЭКЗАМЕН ПО РАЗДЕЛАМ «МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ», «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

1. Гармонические колебания. Основные характеристики колебательного движения. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний.
2. Сложение гармонических колебаний одного направления.
3. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.
4. Вынужденные механические колебания. Условия резонанса.
5. Электрический колебательный контур.
6. Дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний и его решение.
7. Продольные и поперечные волны. Уравнение плоской волны.
8. Стоячие волны. Координаты узлов и пучностей стоячей волны.
9. Электромагнитные волны. Основные свойства электромагнитных волн.
10. Энергия электромагнитных волн. Вектор Умова—Пойнтинга.

5. ВОПРОСЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЭКЗАМЕН ПО РАЗДЕЛУ «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА»

1. Интерференция света. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников.
2. Интерференция света в тонких пленках.
3. Принцип Гюйгенса—Френеля. Метод зон Френеля.

4. Дифракция Фраунгофера на одной щели.
5. Дифракционная решетка. Разрешающая способность решетки.
6. Естественный и поляризованный свет.
7. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера.
8. Закон Малюса.

6. ВОПРОСЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЭКЗАМЕН ПО РАЗДЕЛАМ «КВАНТОВАЯ ОПТИКА», «ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ»

1. Тепловое излучение. Испускательная и поглощательная способность. Закон Кирхгофа.
2. Абсолютно черное тело. Распределение энергии в спектре испускания абсолютно черного тела.
3. Квантовая гипотеза и формула Планка.
4. Закон Стефана–Больцмана.
5. Закон Вина.
6. Внешний фотоэффект и его законы.
7. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотеза де Бройля.
8. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
9. Волновая функция и ее статистический смысл.
10. Уравнение Шредингера.
11. Движение свободной частицы. Решение уравнения Шредингера для движения свободной частицы.
12. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной «яме».
13. Квантовый гармонический осциллятор.
14. Атом водорода.
15. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.
16. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число.
17. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям.
18. Атомное ядро.
19. Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа.
20. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Книга 2. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 2003.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Книга 4. Волны. Оптика. – М.: Наука, 2004.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Книга 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра. – М.: Наука, 2004.
4. *Детлаф А.В., Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2002.
5. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003.
6. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. – М.: Высшая школа, 2002.
7. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. – М.: Высшая школа, 2002.
8. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. – М.: Высшая школа, 2002.
9. *Давыдов В.В.* Курс общей физики для студентов ИДО. Ч. 2: Электростатика. Магнетизм. Колебания и волны. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.
10. *Давыдов В.В.* Курс общей физики для студентов ИДО. Ч. 3: Волновая оптика. Квантовая механика. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.

7. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ

7.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Индукция магнитного поля, создаваемого элементом проводника $d\mathbf{l}$ с током I , равна

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

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор, проведенный от элемента проводника в точку, в которой определяется индукция магнитного поля $d\mathbf{B}$.

Вектор $d\mathbf{B}$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы $d\mathbf{l}$ и $\mathbf{r}$, направлен таким образом, чтобы из его конца кратчайшее вращение вектора $d\mathbf{l}$ до совмещения с вектором $\mathbf{r}$ казалось происходящим против часовой стрелки (правило буравчика или правило правого винта).

Принцип суперпозиции

Магнитная индукция в любой точке поля проводника с током I равна векторной сумме индукций $\Delta \mathbf{B}_i$ элементарных полей, создаваемых всеми участками Δl_i проводника:

$$\mathbf{B} = \sum_i \Delta \mathbf{B}_i,$$

при уменьшении Δl_i до dI сумма по i переходит в интеграл по контуру Γ (проводнику) с током

$$\mathbf{B} = \int_{\Gamma} d\mathbf{B}.$$

Для однородной изотропной среды магнитная индукция B связана с напряженностью магнитного поля H соотношением

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

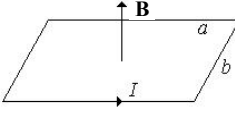
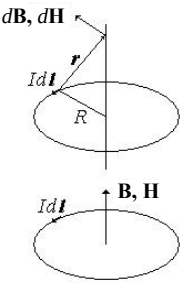
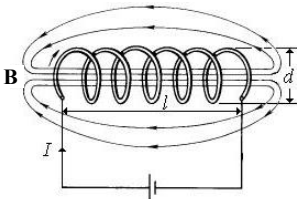
где μ – относительная магнитная проницаемость среды.

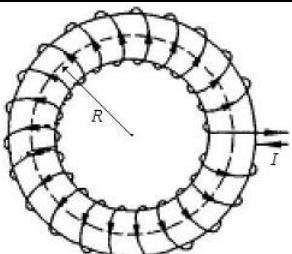
Индукция B (Тл) и напряженность H (А/м) магнитного поля

Система	Рисунок	Индукция $\mathbf{B}$ (Тл) и напряженность $\mathbf{H}$ (А/м) магнитного поля
Прямолинейный проводник с током I		$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$ $H = \frac{1}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$
Бесконечный прямолинейный проводник с током I		$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{r_0}$

		$H = \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r_0}$
--	--	-------------------------------------

О к о н ч а н и е т а б л и ц ы

Система	Рисунок	Индукция B (Тл) и напряженность H (А/м) магнитного поля
Прямоугольный виток с током <i>I</i>		$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{8I \sqrt{a^2 + b^2}}{ab}$ $H = \frac{1}{4\pi} \frac{8I \sqrt{a^2 + b^2}}{ab}$
Круговой виток с током <i>I</i> а) магнитное поле на оси витка; б) магнитное поле в центре витка		а) $B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2p_m}{R^2 + h^2}^{3/2}$ $H = \frac{1}{4\pi} \frac{2p_m}{R^2 + h^2}^{3/2}$ б) $B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2p_m}{R^3}, B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2\pi I}{R}$ $H = \frac{1}{4\pi} \frac{2p_m}{R^3}, H = \frac{I}{2R}$
Соленоид		$B = \mu_0 \mu n I, \quad l \gg d, \quad n = \frac{N}{l}$ $H = nI$

Тороид		$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2NI}{R}$ $H = \frac{NI}{2\pi R}$
--------	---	--

Соленоид – цилиндрическая катушка длиной l и диаметром d , состоящая из большого числа витков проволоки, образующих винтовую линию.

Тороид – кольцевая катушка, имеющая форму тора. Магнитное поле целиком локализовано внутри тороида.

Вектор магнитного момента $\mathbf{p}_m$ плоского контура с током I определяется как $\mathbf{p}_m = I\mathbf{S}$, где вектор $\mathbf{S}$, численно равный площади, охватываемой контуром и направленный по нормали к плоскости контура так, чтобы из конца вектора $\mathbf{p}_m$ ток казался протекающим против часовой стрелки.

Сила Ампера

Сила Ампера – сила, с которой магнитное поле $\vec{B}$ действует на элемент $d\vec{l}$ проводника с током I .

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

Закон Ампера для магнитного взаимодействия в однородной изотропной среде двух элементов проводников $d\mathbf{l}_1$ и $d\mathbf{l}_2$ с токами I_1 и I_2

$$d\mathbf{F}_{12} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{[I_2 d\mathbf{l}_2, I_1 d\mathbf{l}_1, \mathbf{r}_{12}]}{r_{12}^3},$$

где $d\mathbf{F}_{12}$ – сила, действующая на $I_2 d\mathbf{l}_2$ со стороны $I_1 d\mathbf{l}_1$.

Сила, действующая на элемент $d\mathbf{l}$ прямолинейного проводника с током I_1 со стороны длинного проводника с током I_2 , расположенного параллельно первому на расстоянии d , равна

$$dF = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{d} dl.$$

На участок проводника l_1 с током I_1 со стороны длинного проводника с током I_2 , расположенного параллельно первому на расстоянии d , действует сила, равная

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{d} l_1.$$

Проводники с токами I_1 и I_2 , текущими в одном направлении, притягиваются, а с токами I_1 и I_2 , текущими в противоположном направлении, – отталкиваются.

Сила Лоренца

На электрический заряд q , движущийся со скоростью $\mathbf{v}$ в магнитном поле $\mathbf{B}$, действует сила Лоренца

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

Если заряд q движется со скоростью $\mathbf{v}$ в электрическом и магнитном полях, то сила, действующая на заряд, равна

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

В однородном магнитном поле заряд движется по винтовой линии с радиусом r и шагом винта h :

$$r = \frac{m}{|q|} \frac{v \sin \alpha}{B}, \quad h = \frac{2\pi m}{B |q|} v \cos \alpha.$$

Здесь α – угол между вектором скорости заряда и вектором индукции магнитного поля.

Если скорость заряда перпендикулярна силовым линиям магнитного поля ($\alpha = \pi/2$), то заряд движется по окружности радиусом

$$r = \frac{m}{|q|} \frac{v}{B}.$$

Магнитный поток $d\Phi$ через площадку dS равен

$$d\Phi = \mathbf{B}d\mathbf{S} = B \cos \alpha dS ,$$

где α – угол между единичной внешней нормалью к dS и вектором индукции магнитного поля $\mathbf{B}$.

Магнитный поток Φ через поверхность S равен

$$\Phi = \int_S \mathbf{B}d\mathbf{S} = \int_S B \cos \alpha dS .$$

Для однородного магнитного поля $B = \text{const}$ магнитный поток равен

$$\Phi = BS \cos \alpha .$$

Закон электромагнитной индукции

Электродвижущая сила (ЭДС) индукции ε_i в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную данным контуром:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ (В)} .$$

Направления обхода контура и внешней нормали $\mathbf{n}$, принятые при расчете ε_i и Φ , взаимосвязаны: из конца вектора нормали обход контура должен быть виден происходящим против часовой стрелки.

Если замкнутый контур состоит из N витков, то под магнитным потоком понимают полный магнитный поток (потокосцепление) Ψ сквозь поверхности, ограниченные всеми N витками:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i .$$

Правило Ленца: индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемый им магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную данным контуром, уменьшает те изменения магнитного потока, которые вызвали появление индукционного тока.

Возникновение ЭДС индукции в цепи в результате изменения тока называется явлением самоиндукции:

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

где $\Phi_s = LI$, L – индуктивность контура (в генри, Гн).

Индуктивность соленоида ($l \gg d$)

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

Плотность энергии магнитного поля равна

$$w = \frac{1}{2} BH.$$

Энергия магнитного поля в соленоиде равна

$$W = \frac{1}{2} LI^2.$$

7.2. ОПТИКА

Интерференция света

Две волны называются когерентными, если разность их фаз не зависит от времени. Явление пространственного перераспределения световой энергии при наложении когерентных волн называется интерференцией света.

При наложении двух когерентных волн интенсивность I результирующей волны связана с интенсивностями когерентных волн I_1 и I_2 соотношением

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз между когерентными волнами.

Оптической длиной пути s называют произведение геометрической длины пути световой волны в данной среде l и абсолютного показателя преломления n среды

$$s = nl$$

Абсолютный показатель преломления n среды:

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

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, v – скорость света в данной среде.

Разность фаз двух когерентных волн:

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

где оптическая разность хода между лучами 1 и 2 есть

$$\Delta s = \left(\int_2 n dl - \int_1 n dl \right).$$

Двулучевая интерференция показана на рис. 1.

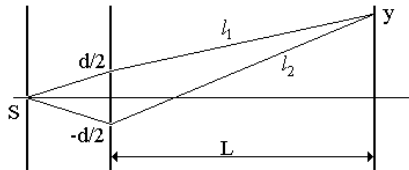


Рис. 1. Схема Юнга:

S – точечный источник света; d – расстояние между двумя малыми отверстиями, которые пропускают когерентные расходящиеся пучки света, на экране наблюдается чередование светлых (максимумы) и темных (минимумы) полос

Координата m -го максимума на экране равна

$$y_m = \frac{L}{d} m \lambda.$$

Координата m -го минимума на экране равна

$$y_m = \frac{L}{d} \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda,$$

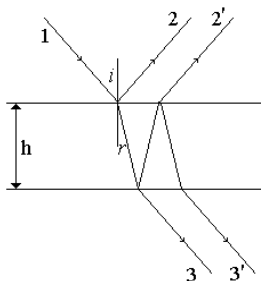


Рис. 2. Интерференция в отраженном свете (лучи 2 и 2') и в проходящем свете (лучи 3 и 3'); h – толщина пленки

где $m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Ширина интерференционной полосы определяется расстоянием между соседними максимумами (минимумами) интенсивности света и равна

$$\Delta y = y_{m+1} - y_m = \frac{L}{d} \lambda,$$

где λ – длина волны света.

Интерференция в тонких пленках показана на рис. 2.

Оптическая разность хода:

а) в отраженном свете

$$\Delta l = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = 2hn \cos r + \frac{\lambda}{2};$$

б) в проходящем свете

$$\Delta l = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = 2hn \cos r.$$

Условие максимума интенсивности света

$$\Delta l = m\lambda, \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Условие минимума интенсивности света

$$\Delta l = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Дифракция света

• Дифракцией света называется явление огибания лучами света границы непрозрачных тел, проникновение в область геометрической тени.

Радиус m -й зоны Френеля равен для сферического волнового фронта

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

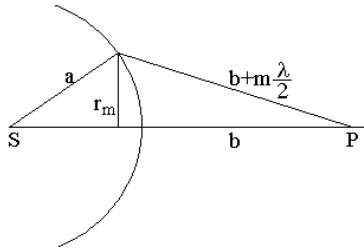


Рис. 3. К методу зон Френеля

Если m – четное, то в точке Р наблюдается минимум интенсивности света; при нечетном m – максимум.

В случае плоского волнового фронта $a \rightarrow \infty$

$$r_m = \sqrt{bm\lambda}.$$

- Дифракция света на одной щели

Интенсивность света при дифракции на одной щели

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \Phi}{\Phi} \right)^2, \quad \Phi = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi,$$

где b – ширина щели; φ – угол дифракции света; λ – длина волны света.

Условие минимума интенсивности света

$$b \sin \varphi_m = m\lambda, \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

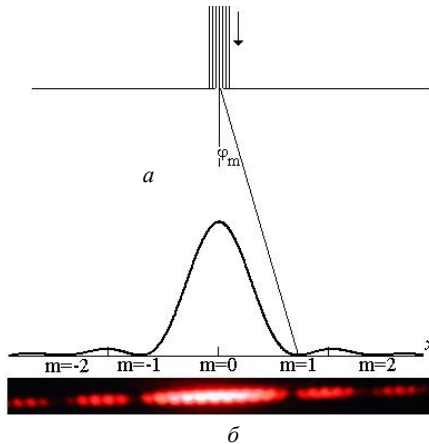


Рис. 4. Дифракция Фраунгофера на одной щели:

a – схема установки и распределение интенсивности света на экране; *b* – пространственное распределение монохроматического света при дифракции света на одной щели

- Дифракционная решетка – оптический элемент, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (канавок, щелей, выступов), нанесенных тем или иным способом на плоскую или вогнутую поверхность.

Условие главных максимумов интенсивности света при дифракции света на дифракционной решетке

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

где d – период (постоянная) дифракционной решетки.

Поляризация света

Свет, в котором в равной мере представлены электромагнитные волны со всевозможными направлениями колебаний векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$, называется естественным (неполяризованным) светом.

Свет, в котором векторы $\mathbf{E}$ во всех точках поля колеблются вдоль параллельных прямых, называется линейно поляризованным или плоскополяризованным светом.

Устройства, служащие для преобразования естественного света в поляризованный свет, называются поляризаторами.

Закон Брюстера

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

где i_B – угол падения, при котором отраженная световая волна полностью поляризована; $n_{21} = n_2 / n_1$ – относительный показатель преломления.

Закон Малюса

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

где I_0 – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на поляризатор; I – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего поляризатор; α – угол между направлениями колебаний светового вектора волны $\mathbf{E}_0$, падающего на поляризатор, и плоскостью пропускания поляризатора. Интенсивность естественного света при прохождении через поляризатор уменьшается в два раза (в отсутствии потерь).

При переходе из оптически более плотной среды в среду оптически менее плотную ($n_1 > n_2$) может возникнуть явление полного внутреннего отражения, когда при углах падения больших некоторого предельного угла свет полностью отражается от границы раздела двух сред. Предельный угол падения определяется из условия

$$\sin i' = n_{21}.$$

7.3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Тепловое излучение

Поток энергии (мощность излучения), испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям, называют **энергетической светимостью тела** R_e .

Энергетическая светимость тела R_e определяется через **спектральную плотность энергетической светимости** (испускательная способность) $r_{\omega, T}$ $r_{\lambda, T}$ как

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda.$$

Поглощательной способностью $a_{\omega,T}$ поверхности тела для излучения той же частоты, направления распространения и поляризации называется безразмерная величина, показывающая, какая доля энергии падающего излучения поглощается рассматриваемой поверхностью тела.

Закон Кирхгофа

Отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел и является универсальной функцией только частоты и температуры:

$$\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}} = f(\omega, T).$$

Закон Стефана–Больцмана для абсолютно черного тела

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

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

Закон смещения Вина

Максимум спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ смещается с изменением температуры в сторону более коротких длин волн.

$$\lambda_{\max} T = b,$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Формула Планка

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1},$$

$$f(\lambda, T) = \frac{4\hbar^2 c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{2\pi \hbar c}{kT\lambda}\right) - 1},$$

где $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – приведенная постоянная Планка.

Фотоэлектрический эффект

- Формула Эйнштейна

$$h\nu = A + E_{k\max},$$

где $h\nu = \hbar\omega = \varepsilon$ – энергия фотона с частотой $\nu = c/\lambda$, $h = 2\pi\hbar = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $E_{k\max}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов; A – работа выхода электронов из металла (см. приложение).

- Красная граница фотоэффекта

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

где λ_0 – максимальная длина волны излучения, при которой еще возможен фотоэффект; ν_0 – минимальная частота волны излучения, при которой еще возможен фотоэффект.

7.4. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Волновые свойства вещества

Длина волны де Бройля

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

Принцип неопределенности Гейзенберга

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2 ,$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar / 2 ,$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar / 2 ,$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2 ,$$

где $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ – неопределенности проекции импульса частицы на оси x, y, z , а $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – неопределенности ее координат; ΔE – неопределенность энергии состояния частицы; Δt – неопределенность времени пребывания частицы в данном квантовом состоянии.

8. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Батарея аккумуляторов с ЭДС $\varepsilon = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,01$ Ом соединена с потребителем двумя медными проводами, расположенными на расстоянии $d = 5$ см один от другого. Провода закреплены на изоляторах, расстояние между которыми $l_1 = 0,5$ м. Определить силу, действующую на изоляторы при коротком замыкании на зажимах потребителя, если длина подводящей линии 20 м, а сечение проводов 3 см^2 . Удельное сопротивление меди равно $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Р е ш е н и е

Сила Ампера, действующая на провода длиной l , равна

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I^2}{d} l .$$

Чтобы определить силу тока, воспользуемся законом Ома:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} .$$

Общее сопротивление подводящих энергию проводов

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1,72 \cdot 10^{-8} \frac{2 \cdot 20}{3 \cdot 10^{-4}} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Ток короткого замыкания

$$I = \frac{12}{0,0023 + 0,01} = 976 \text{ А.}$$

Сила Ампера, действующая на провод:

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I^2}{d} l = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} \frac{2 \cdot 976^2}{0,05} 20 = 76 \text{ Н.}$$

Число изоляторов на длине провода l :

$$N = \frac{l}{l_1} + 1 = \frac{20}{0,5} + 1 = 41.$$

Тогда один изолятор будет испытывать воздействие со стороны магнитного поля другого провода, равное

$$F_1 = \frac{F}{N} = \frac{76}{41} \cong 1,9 \text{ Н.}$$

Ответ: на один изолятор приходится силовое воздействие в 1,9 Н.

2. Циклотрон предназначен для ускорения протонов до энергии $E = 8 \cdot 10^{-13}$ Дж. Определить наибольший радиус орбиты, по которой движется протон, если индукция магнитного поля равна 1 Тл.

Р е ш е н и е

Максимальная кинетическая энергия

$$E_{k \max} = E, \quad m \frac{v_{\max}^2}{2} = E,$$

тогда скорость протона, движущегося по орбите с наибольшим радиусом, равна

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-13}}{1,67 \cdot 10^{-27}}} = 3,1 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

Поскольку $v_{\max}$ на порядок меньше скорости света, релятивистскими эффектами пренебрегаем. Для вычисления наибольшего радиуса орбиты протона воспользуемся формулой

$$r = \frac{m}{|q|} \frac{v}{B},$$

Полученной с использованием II закона Ньютона и силы Лоренца. Тогда

$$r_{\max} = \frac{m}{|q|} \frac{v_{\max}}{B} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{3,1 \cdot 10^7}{1} = 0,32 \text{ м.}$$

Ответ: наибольший радиус орбиты протона $r_{\max} = 0,32 \text{ м.}$

3. Железнодорожные рельсы изолированы друг от друга и от земли и соединены через вольтметр. Каково показание прибора, если по рельсам проходит поезд со скоростью $v = 20 \text{ м/с}$? Вертикальную составляющую магнитного поля Земли принять равной 50 мкТл , а расстояние между рельсами $l = 1,54 \text{ м}$. Самоиндукцией пренебречь.

Р е ш е н и е

Найдем магнитный поток, проходящий через контур, образованный парой рельс, колесной парой и участком цепи с вольтметром

$$\Phi = Blx = Blvt.$$

ЭДС индукции равна

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = -Blv = -5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,54 \cdot 20 = -1,54 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Ответ: $\varepsilon \cong -0,0015 \text{ В.}$

4. На пути луча, идущего в воздухе, поставили стеклянную пластинку толщиной 1 см (показатель преломления стекла $1,5$). Насколько изменится оптическая длина пути луча, если луч падает на пластину: а) нормально; б) под углом 30° ?

Р е ш е н и е

Оптическая разность хода луча

$$\Delta s = \left(\int_2 n dl - \int_1 n dl \right) = n_1 - n_0 \cdot l ;$$

а) если луч света падает нормально, то $l = h = 0.01$ м, тогда

$$\Delta s = n_1 - n_0 \cdot l = (1,5 - 1,0) \cdot 0,01 = 0,005 \text{ м};$$

б) если луч света падает под углом 30° , то

$$l = \frac{h}{\cos r} = \frac{h}{\sqrt{1 - \sin^2 r}} = \frac{n_{21} h}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 i}} = \frac{1,5 \cdot 0,01}{\sqrt{2,25 - 0,25}} = 0,0106 \text{ м},$$

тогда

$$\Delta s = n_1 - n_0 \cdot l = (1,5 - 1,0) \cdot 0,0106 = 0,0053 \text{ м}.$$

Ответ: а) $\Delta s = 0,005$ м; б) $\Delta s = 0,0053$ м.

5. В опыте Юнга использовались два когерентных источника света с длиной волны 589 нм. Найти расстояние между третьим и шестым минимумами на экране, если расстояние между когерентными источниками равно $d = 0,2$ мм, а расстояние между источниками и экраном равно $L = 2$ м.

Р е ш е н и е

Найдем координаты минимумов интенсивности света, для этого воспользуемся формулой

$$y_m = \frac{L}{d} \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda ,$$

тогда

$$y_3 = \frac{2}{2 \cdot 10^{-4}} 3,5 \cdot 5,89 \cdot 10^{-7} = 0,0206 \text{ м},$$

$$y_6 = \frac{2}{2 \cdot 10^{-4}} 6,5 \cdot 5,89 \cdot 10^{-7} = 0,0383 \text{ м.}$$

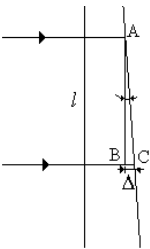
Расстояние между третьим и шестым минимумами на экране равно

$$\Delta y = 0,0383 - 0,0206 = 0,0177 \text{ м.}$$

Ответ: $\Delta y = 17,7 \text{ мм.}$

6. Мыльная пленка, расположенная вертикально, вследствие стекания жидкости, образует клин. Пленка освещается источником белого света через красный светофильтр (длина волны 650 нм). Свет падает нормально к поверхности пленки. Расстояние между соседними темными полосами на поверхности пленки равно 3,5 мм. Определите угол между гранями клина. Показатель преломления мыльной пленки 1,33.

Р е ш е н и е



Параллельный монохроматический пучок света, падая нормально на поверхность мыльной пленки, отражается от передней и задней поверхности. Эти пучки света когерентны, следовательно, интерferируют. Интерференционную картину на поверхности пленки представляют светлые и темные полосы. Темные полосы видны на тех участках пленки, для которых разность хода кратна нечетному числу длин полуволн, тогда можно для соседних темных полос записать следующие

соотношения:

$$\Delta l_m = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad \Delta l_{m+1} = \left(m + \frac{3}{2}\right)\lambda.$$

Разность $\Delta = h_{m+1} - h_m$ можно найти из формул

$$2h_{m+1}n \cos r + \frac{\lambda}{2} = \left(m + \frac{3}{2}\right)\lambda,$$

$$2h_m n \cos r + \frac{\lambda}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$

где $\cos r = 1$. Проводя очевидные преобразования, получаем

$$\Delta = h_{m+1} - h_m = \frac{\lambda}{2n} = \frac{6,5 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 1,33} = 2,44 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

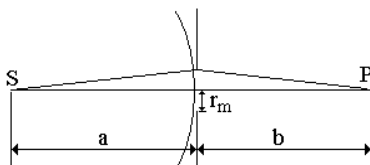
Угол клина найдем из треугольника ABC.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta}{l}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{2,44 \cdot 10^{-7}}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 7 \cdot 10^{-5}, \quad \alpha = 7 \cdot 10^{-5} \text{ рад.}$$

Ответ: угол клина $\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ рад.

7. Между источником света и экраном поместили ирисовую диафрагму с круглым отверстием, радиус которого можно менять в процессе опыта. Расстояния от диафрагмы до источника и экрана равны соответственно 100 и 125 см. Определите длину волны света, если максимум освещенности в центре дифракционной картины наблюдается при радиусе отверстия 1 мм, а следующий максимум – при 1,29 мм.

Р е ш е н и е



Максимум освещенности в точке наблюдения P достигается при нечетном числе зон Френеля, помещающихся в отверстии ирисовой диафрагмы.

Применим формулу для радиуса m -й и $m + 2$ -й зон Френеля

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}, \quad r_{m+2} = \sqrt{\frac{ab}{a+b} (m+2) \lambda}.$$

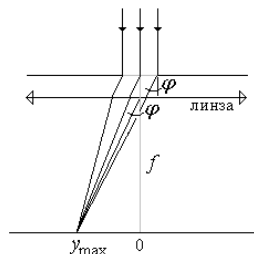
Тогда, проводя очевидные преобразования формул, получим выражение для длины волны

$$r_m^2 = \frac{ab}{a+b} m \lambda, \quad r_{m+2}^2 = \frac{ab}{a+b} (m+2) \lambda,$$

$$\lambda = \frac{a+b}{2ab} (r_{m+2}^2 - r_m^2) = \frac{1,25+1,00}{2 \cdot 1,25} (1,29 \cdot 10^{-3})^2 - (1,00 \cdot 10^{-3})^2 = 5,98 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: длина волны излучения $\lambda = 5,98 \cdot 10^{-7}$ м.

8. На дифракционную решетку (см. рисунок), содержащую 500 штрихов на миллиметр, нормально падает свет от натриевого пламени (длина волны 589 нм). Дифракционный спектр проецируется на экран линзой с фокусным расстоянием 0,75 м. На каком расстоянии от центральной полосы наблюдается крайний максимум? Сколько максимумов может наблюдаться на экране?



Решение

Условие максимума интенсивности света при дифракции света на решетке

$$d \sin \varphi_m = m \lambda.$$

Крайний максимум будем искать из условия $\sin \varphi_m \leq 1$, и порядок полосы m есть целое число:

$$\sin \varphi_m = m \frac{\lambda}{d}, \quad m_{\max} \frac{\lambda}{d} \leq 1,$$

$$m_{\max} \leq \frac{d}{\lambda} = \frac{10^{-3}}{500} \frac{1}{5,89 \cdot 10^{-7}} = 3,4.$$

Следовательно, $m_{\max} = 3$. Найдём угол дифракции φ_3 из условия максимума

$$\sin \varphi_3 = 3 \frac{\lambda}{d} = 3 \frac{5,89 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-6}} = 0,884, \quad \varphi_3 \cong 62^\circ.$$

Расстояние до наиболее удаленной полосы дифракции найдем из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{y_{\max}}{f}, \quad y_{\max} = f \operatorname{tg} \varphi_3 = 0,75 \cdot 1,88 = 1,41 \text{ м.}$$

Число максимумов света равно удвоенному числу полос с каждой стороны пространственного спектра плюс центральный максимум, т.е. $2m_{\max} + 1 = 7$.

Ответ: $y_{\max} = 1,41$ м, 7 максимумов на экране.

9. Естественный свет проходит через два поляризатора, угол между главными плоскостями которых 30° . Во сколько раз изменится интенсивность света, прошедшего эту систему, если угол между плоскостями поляризаторов увеличить в два раза?

Р е ш е н и е

Согласно закону Малюса

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

где I_1 — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на поляризатор; I_2 — интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего поляризатор; α — угол между направлениями колебаний светового вектора волны $\mathbf{E}$, падающей на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора. Интенсивность естественного света I_0 при прохождении через поляризатор уменьшается в два раза (в отсутствие потерь), т.е.

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0.$$

При увеличении угла α в два раза получаем

$$I_3 = I_1 \cos^2 2\alpha.$$

Тогда отношение интенсивностей света

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{I_1 \cos^2 \alpha}{I_1 \cos^2 2\alpha} = 3.$$

Ответ: интенсивность изменяется (уменьшается) в три раза.

10. Вычислить температуру поверхности Земли, считая ее постоянной, в предположении, что Земля как черное тело излучает столько энергии, сколько ее получает от Солнца. Интенсивность солнечного излучения вблизи Земли принять равным $1,37 \text{ кВт/м}^2$.

Р е ш е н и е

Применим закон Стефана–Больцмана для абсолютно черного тела

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

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$. Тогда температура поверхности Земли будет равна

$$T = \left(\frac{R_e}{\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{1370}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/4} = 394 \text{ К}.$$

В градусах Цельсия эта температура равна $394 - 273 = 121 \text{ }^\circ\text{С}$, почему же вся вода на поверхности Земли при такой температуре не испарилась? Очевидно, что предположение о том, что Земля есть абсолютно черное тело, неправильное. Практически вся падающая на Землю солнечная энергия поглощается и перерабатывается биосферой, причем полное количество тепловой энергии излучается поверхностью Земли в инфракрасном диапазоне, оно равно полному количеству солнечной энергии, падающему на поверхность Земли.

Ответ: $T = 394 \text{ К}$.

11. Найти работу выхода с поверхности некоторого металла, если при поочередном освещении его электромагнитным излучением с длинами волн $0,33$ и $0,54 \text{ мкм}$ максимальные скорости фотоэлектронов различаются в 2 раза.

Р е ш е н и е

Согласно формуле Эйнштейна для двух длин волн запишем систему уравнений

$$\frac{hc}{\lambda_1} = A + \frac{mv_{k \max 1}^2}{2},$$

$$\frac{hc}{\lambda_2} = A + \frac{mv_{k \max 2}^2}{2}.$$

Преобразуем эту систему уравнений таким образом:

$$\frac{v_{k \max 1}^2}{v_{k \max 2}^2} = \frac{\frac{hc}{\lambda_1} - A}{\frac{hc}{\lambda_2} - A},$$

$$\frac{v_{k \max 1}^2}{v_{k \max 2}^2} \left(\frac{hc}{\lambda_2} - A \right) = \frac{hc}{\lambda_1} - A, \quad A \left(\frac{v_{k \max 1}^2}{v_{k \max 2}^2} - 1 \right) = \frac{v_{k \max 1}^2}{v_{k \max 2}^2} \frac{hc}{\lambda_2} - \frac{hc}{\lambda_1},$$

$$A = \left(\frac{v_{k \max 1}^2}{v_{k \max 2}^2} \frac{hc}{\lambda_2} - \frac{hc}{\lambda_1} \right) \left(\frac{v_{k \max 1}^2}{v_{k \max 2}^2} - 1 \right)^{-1} =$$

$$= 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \left(\frac{4}{5,4 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{3,3 \cdot 10^{-7}} \right) \frac{1}{3} = 2,9 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Так как $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, работа выхода электрона из металла равна $1,8 \text{ эВ}$.

Ответ: работа выхода электрона из металла равна $1,8 \text{ эВ}$.

12. Какую ускоряющую разность потенциалов U_{12} должен пройти электрон, чтобы дебройлевская длина волны была равна 1 нм ?

Р е ш е н и е

Импульс электрона с дебройлевской длиной волны в 1 нм равен

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{10^{-9}} = 6,62 \cdot 10^{-25} \text{ кгм/с.}$$

Приращение кинетической энергии электрона идет за счет работы ускоряющего электрического поля

$$E_{k2} - E_{k1} = A_{12}, \quad A_{12} = q \cdot \varphi_1 - \varphi_2 = qU_{12}.$$

Так как в условии задачи начальное состояние не определено, то будем считать $E_{k1} = 0$, следовательно,

$$\frac{p^2}{2m} = qU_{12},$$

и

$$U_{12} = \frac{p^2}{2mq} = \frac{6,62 \cdot 10^{-25}^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,5 \text{ В.}$$

Ответ: ускоряющая разность потенциалов равна $U_{12} = 1,5 \text{ В}$.

13. В атоме электрон находится в возбужденном состоянии в течение 10 нс. Оцените естественную ширину спектральной линии.

Р е ш е н и е

Согласно соотношению неопределенности Гейзенберга

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2,$$

где $\Delta t = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ – неопределенность времени пребывания частицы в данном квантовом состоянии; ΔE – неопределенность энергии состояния частицы, в нашем случае $\Delta E = \hbar \Delta \omega$ определяет естественную ширину спектральной линии $\Delta \omega$. Таким образом,

$$\Delta \omega = \frac{\Delta E}{\hbar} = \frac{1}{\hbar} \frac{\hbar}{2 \Delta t} = \frac{1}{2 \Delta t} = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}.$$

Ответ: естественная ширина спектральной линии $\Delta \omega = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$.

9. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Напоминаем основные требования, предъявляемые к оформлению контрольных работ:

- оформление каждой задачи необходимо начинать с новой страницы;
- условия задачи следует переписывать полностью, без сокращений; затем необходимо сделать краткую запись условия в общепринятых буквенных обозначениях, используя систему единиц СИ;
- решение задачи необходимо проводить в общем виде (для формул, являющихся частным случаем, следует непременно приводить вывод);
- полученную формулу необходимо проверить по размерности и только после этого приступать к вычислениям; при вычислениях необходимо соблюдать правила приближенных вычислений.

10. СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 2

Содержание		Номера задач
1	Магнитное поле. Магнитная индукция. Закон Био–Савара–Лапласа. Принцип суперпозиции	201–210
2	Сила Лоренца. Сила Ампера	211–220
3	Магнитный поток. Закон электромагнитной индукции. ЭДС самоиндукции	221–230
4	Интерференция света от двух когерентных источников. Интерференция в тонких пластинках и пленках, в клиновидных пластинках	231–240
5	Дифракция света на одной щели. Зоны Френеля. Дифракционная решетка	241–250
6	Поляризация света	251–260
7	Тепловое излучение. Внешний фотоэффект	261–270
8	Волны де Бройля. Принцип неопределенности	271–280

11. ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ ЗАДАЧ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 2

Вариант	Номера задач							
0	210	220	230	240	250	260	270	280
1	201	211	221	231	241	251	261	271
2	202	212	222	232	242	252	262	272
3	203	213	223	233	243	253	263	273
4	204	214	224	234	244	254	264	274
5	205	215	225	235	245	255	265	275
6	206	216	226	236	246	256	266	276
7	207	217	227	237	247	257	267	277
8	208	218	228	238	248	258	268	278
9	209	219	229	239	249	259	269	279

12. ЗАДАЧИ

201. Два круговых витка расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры этих витков совпадают. Радиус каждого витка $R=2,0$ см, а токи в витках $I_1=I_2=5,0$ А. Найти напряженность магнитного поля в центре этих витков.

202. По квадратной рамке со стороной $a=5,0$ см течет ток $I=10,0$ А. Какова магнитная индукция в точке пересечения диагоналей квадрата?

203. Два круговых витка расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры этих витков совпадают. Радиусы витков $R_1=2,5$ см, $R_2=4,0$ см а токи в витках $I_1=3,0$ А и $I_2=5,0$ А. Найти индукцию магнитного поля в центре этих витков.

204. По проводнику, изогнутому в виде окружности, течет ток. Напряженность магнитного поля в центре окружности $H_1=50$ А/м. Не

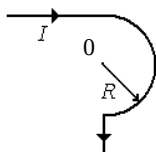
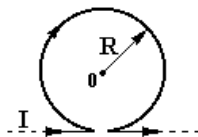
изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Определить напряженность магнитного поля в центре этого квадрата.

205. Два бесконечно длинных прямых проводника располагаются под прямым углом в параллельных плоскостях, расстояние между которыми $d=20$ см. Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей на середине общего перпендикуляра к проводникам, если $I_1=100$ А, а $I_2=50$ А.

206. Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток $I=100$ А. Вычислить напряженность магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе угла и удаленной от вершины угла на расстояние $d=100$ см.

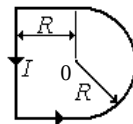
207. По двум бесконечно длинным параллельным проводам текут токи $I_1=50$ А и $I_2=100$ А в противоположных направлениях. Расстояние между проводами $d=50$ см. Определить магнитную индукцию B в точке, удаленной на расстояние $r_1=30$ см от первого и $r_2=40$ см от второго провода.

208. Бесконечно длинный тонкий проводник с током $I=100$ А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R=20,0$ см. Определить магнитную индукцию поля, создаваемого этим током в точке 0.



209. Проводник с током $I=40$ А лежит в плоскости и имеет форму, показанную на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R=20$ см. Определить магнитную индукцию B поля, создаваемого этим током в точке 0.

210. Проводник с током $I=20$ А лежит в плоскости и имеет форму, показанную на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R=40$ см. Определить напряженность и магнитную индукцию поля, создаваемого этим током в точке 0.



211. Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле с индукцией $B=0,10$ Тл. По проводнику длиной $L=70$ см, расположенному под углом $\alpha=60^\circ$ к силовым линиям магнитного поля, течет ток $I=70$ А. Найти силу, действующую на проводник.

212. Прямоугольная проволочная рамка со сторонами $l_1=10,0$ см и $l_2=5,0$ см расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что ее ближайшая сторона l_1 , параллельная проводу, находится на расстоянии $d=2,0$ см от него. Определить силу, действующую на рамку, если токи, текущие по проводу и рамке, соответственно равны $I_1=100$ А, $I_2=1,0$ А.

213. Квадратная рамка со стороной $a=15$ см, по которой течет ток $I=50$ А, расположена в магнитном поле с индукцией $B=0,10$ Тл так, что силовые линии поля перпендикулярны плоскости рамки. Найти силу, действующую на одну сторону рамки.

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

215. Шины генератора представляют собой две параллельные медные полосы длиной $L=2,00$ м каждая, отстоящие друг от друга на $d=20$ см. Определить силу взаимного отталкивания шин в случае короткого замыкания, когда по ним течет ток $I=10$ кА.

216. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U=600$ В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,30$ Тл и начал двигаться по окружности. Вычислить ее радиус.

217. Ион, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U=645$ В, влетел в скрещенные под прямым углом однородные магнитное

$B=1,5 \cdot 10^{-1}$ Тл и электрическое $E=200$ кВ/м поля перпендикулярно к ним. Определить отношение заряда иона к его массе, если ион в этих полях движется прямолинейно.

218. Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U=300$ В, движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии $d=4,0$ мм от него. Какая по величине сила подействует на электрон, если по проводнику пустить ток $I=5,0$ А?

219. Протон и α -частица, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Во сколько раз радиус кривизны R_1 траектории α -частицы больше радиуса кривизны R_2 траектории протона?

220. Перпендикулярно магнитному полю с индукцией $B=0,10$ Тл возбуждено электрическое поле напряженностью $E=100$ кВ/м. Заряженная частица движется перпендикулярно обоим полям, не отклоняясь от прямолинейной траектории. Определить скорость частицы.

221. Квадратная проволоочная рамка со стороной $a=5,0$ см и сопротивлением $R=10$ мОм находится в однородном магнитном поле $B=40$ мТл. Нормаль к плоскости рамки составляет угол $\alpha=30^\circ$ с линиями магнитной индукции. Определить заряд Q , который пройдет по рамке, если магнитное поле выключить.

222. Медный провод диаметром $d=1,0$ мм согнут в виде квадрата со стороной $a=4,0$ см, и концы его замкнуты. Эта рамка помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,20$ Тл так, что ее плоскость перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определить заряд, который потечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию. Удельное сопротивление меди $\rho=1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

223. Прямой провод длиной $l=40$ см движется в однородном магнитном поле со скоростью $v=5,0$ м/с перпендикулярно линиям поля

и оси провода. Появившаяся при этом разность потенциалов на концах провода равна $U=0,60$ В. Определить индукцию магнитного поля.

224. В магнитное поле с индукцией $B=0,01$ Тл помещен круговой виток из медной проволоки. Площадь витка $S=16$ см², а полное сопротивление проволоки $R=250$ Ом. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости витка. Какой заряд Q пройдет по витку при исчезновении магнитного поля?

225. На соленоид длиной $L=20$ см и площадью поперечного сечения $S=30$ см² надет проволочный виток того же сечения. Соленоид имеет $N=320$ витков, и по нему идет ток $I=3,0$ А. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке при уменьшении тока в соленоиде в течение $\Delta t=1,0$ мс?

226. Катушка, состоящая из $N=400$ витков проволоки, помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,02$ Тл. Ось катушки параллельна силовым линиям магнитного поля. Какой заряд пройдет по катушке при исчезновении магнитного поля? Сопротивление катушки $R=15$ Ом, диаметр витка $d=5,0$ см.

227. Соленоид содержит $N=800$ витков. Сечение сердечника (из немагнитного материала) $S=10$ см². По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B=8,0$ мТл. Определить среднее значение ЭДС самоиндукции, которая возникает на зажимах соленоида, если сила тока уменьшается практически до нуля за время $\Delta t=0,8$ мс.

228. Короткая катушка, содержащая $N=10$ витков диаметром $d=4,0$ см, помещена в однородное магнитное поле, индукция которого $B=0,020$ Тл. Ось катушки параллельна линиям поля. Сопротивление катушки $R=10,0$ Ом. Какой заряд пройдет по катушке при повороте ее на $\delta=90^\circ$?

229. По обмотке тороида течет ток $I=0,60$ А, создающий в стальном сердечнике магнитную индукцию $B=1,22$ Тл. Витки провода диаметром $d=0,40$ мм плотно прилегают друг к другу. Найти энергию W магнитного поля тороида, если площадь сечения его $S=4,0$ см², диаметр средней линии $D=30$ см.

230. В соленоиде сечением $S=5,0$ см² создан магнитный поток $\Phi=20$ мкВб. Определить объемную плотность ω энергии магнитного поля соленоида. Сердечник отсутствует.

231. Пучок параллельных лучей ($\lambda=0,60$ мкм) падает под углом $\alpha=30^\circ$ на мыльную пленку ($n=1,3$). При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут максимально ослаблены интерференцией? Максимально усилены?

232. На мыльную пленку ($n=1,3$), находящуюся в воздухе, падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=0,52$ мкм под углом $\alpha=30^\circ$. При какой наименьшей толщине пленки она будет казаться темной в проходящем свете?

233. Какова наименьшая возможная толщина плоскопараллельной пластинки с показателем преломления $n=1,5$, если при освещении белым светом под углом $i_1=45^\circ$ и $i_2=60^\circ$ в отраженном свете она кажется красной ($\lambda_k=0,74$ мкм)?

234. На тонкую мыльную пленку ($n_1=1,33$) толщиной $d=1,25$ мкм падает нормально монохроматический свет. В отраженном свете пленка кажется светлой. Какой минимальной толщины надо взять тонкую пленку скипидара ($n_2=1,48$), чтобы она в этих же условиях казалась темной?

235. Интенсивность света, попадающего на пленку в фотоаппарате, снижается из-за потерь при отражении света от объектива. Эти потери уменьшают нанесением на объектив «просветляющей» пленки (лучи, отраженные от ее поверхностей, интерферируют в противофазе). Рассчитать показатель преломления пленки $n_{пл}$, если толщина ее

$d=0,20$ мкм, показатель преломления воздуха $n_0 \approx 1,0$, а стекла объекта $n_{\text{ст}}=1,48$. Пленка предназначена для фотографирования в синем свете $\lambda=5,4 \cdot 10^{-7}$ м.

236. На тонкий стеклянный клин ($n=1,52$) с углом $1'$ падает нормально к поверхности клина пучок монохроматического света длиной волны $\lambda=0,591$ мкм. Сколько темных полос приходится на 1 см клина?

237. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин. Интерференция наблюдается в отраженном свете через красное стекло ($\lambda_{\text{к}}=6,31 \cdot 10^{-5}$ см). Расстояние между соседними красными полосами при этом равно $\Delta x=3,0$ мм. Затем эта же пленка наблюдается через синее стекло ($\lambda_{\text{с}}=4,0 \cdot 10^{-5}$ см). Найти расстояние между соседними синими полосами, если в обоих случаях свет падает нормально к поверхности пленки.

238. Воздушный клин образован двумя стеклянными пластинками, скрепленными под углом α . На клин нормально падает свет длиной волны $\lambda=0,533$ мкм. В отраженном свете на поверхности клина видны интерференционные полосы. Ширина полосы $\Delta x=2,0$ мм. Как изменится интерференционная картина, если пространство между пластинками заполнить водой? Чему будет равна ширина полосы? Показатели преломления воздуха, воды и стекла соответственно: $n_0=1,0$, $n_{\text{в}}=1,33$, $n_{\text{ст}}=1,87$.

239. На пути одного из интерферирующих лучей в опыте Юнга помещается стеклянная пластинка толщиной $d=12$ мкм. Определить, на сколько полос сместится интерференционная картина, если показатель преломления стекла $n_{\text{ст}}=1,5$, длина волны света $\lambda=0,75$ мкм и свет падает на пластинку нормально.

240. В опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей помещалась тонкая стеклянная пластинка, вследствие чего центральная светлая полоса смещалась в положение, первоначально занятое пятой

светлой полоской (не считая центральной). Луч падает на пластинку перпендикулярно. Показатель преломления пластинки $n=1,5$. Толщина пластинки $d=6,0$ мкм. Какова длина волны?

241. На круглое отверстие радиусом $d=1,0$ мм в непрозрачном экране падает нормально параллельный пучок света с длиной волны $\lambda=0,50$ мкм. На пути лучей, прошедших через отверстие, помещают экран. Определить максимальное расстояние от отверстия до экрана, при котором в центре дифракционной картины еще будет наблюдаться темное пятно.

242. Монохроматический свет ($\lambda=0,50$ мкм) падает нормально на круглое отверстие диаметром $d=1,0$ см. На каком расстоянии от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы в отверстии помещалась одна зона Френеля, две зоны Френеля?

243. На щель шириной $a=0,10$ мм нормально падает параллельный пучок света от монохроматического источника ($\lambda=0,60$ мкм). Определить ширину центрального максимума в дифракционной картине, проектируемой при помощи линзы, находящейся непосредственно за щелью, на экран, отстоящий от линзы на расстоянии $L=1,00$ м.

244. Какой должна быть ширина щели, чтобы первый дифракционный максимум наблюдался под углом $\varphi=90^\circ$ при освещении: красным светом $\lambda_1=0,760$ мкм, синим светом $\lambda_2=0,440$ мкм? Под каким углом наблюдается минимум для λ_1 и для λ_2 ?

245. На щель шириной $a=0,10$ мм падает нормально параллельный пучок белого света ($0,40 \dots 0,80$ мкм). Найти ширину третьего максимума на экране, отстоящем от щели на расстояние $L=2,00$ м.

246. На щель падает нормально параллельный пучок монохроматического света. Длина волны укладывается в щели 4 раза. Под каким углом будет наблюдаться второй дифракционный минимум интенсивности света?

247. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию в спектре

третьего порядка накладывается красная линия гелия ($\lambda = 6,7 \cdot 10^{-5}$ см) спектра второго порядка?

248. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ($\lambda = 6,3 \cdot 10^{-7}$ м) видна в спектре третьего порядка под углом $\varphi = 60^\circ$. Какая спектральная линия видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? Чему равна постоянная дифракционной решетки?

249. Определить наибольший порядок дифракционного спектра для спектральной линии с длиной волны $\lambda = 0,405$ мкм при наблюдении с помощью решетки, имеющей 500 штрихов на 1 мм.

250. На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,600$ мкм. Найти общее число главных дифракционных максимумов на экране, которые дает эта решетка.

251. Угол максимальной поляризации при отражении света от кристалла каменной соли равен $\varphi = 57^\circ$. Определить скорость распространения света в этом кристалле.

252. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества равен $\varphi = 45^\circ$. Чему равен угол полной поляризации для этого вещества?

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

254. Чему равен показатель преломления стекла, если отраженный от него луч будет полностью поляризован при угле преломления $\beta = 30^\circ$?

255. Угол максимальной поляризации при отражении света от некоторого кристалла равен $\varphi = 60^\circ$. Определить угол полного внутреннего отражения для этого вещества.

256. Определить показатель преломления вещества, для которого угол полной поляризации отраженного луча равен углу полного внутреннего отражения.

257. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через них, уменьшилась в 4 раза? Поглощением света пренебречь.

258. Частично поляризованный свет рассматривается через поляризатор. При повороте анализатора на угол $\alpha = 45^\circ$ по отношению к положению, обеспечивающему максимальную яркость выходящего пучка, яркость света уменьшилась в 1,5 раза. Определить отношение естественной и поляризованной составляющей в падающем световом потоке.

259. Чему равен угол между главными плоскостями поляризаторов, если световой поток, выходящий из анализатора, составляет 25 % от светового потока, прошедшего через поляризатор?

260. Между двумя скрещенными поляризаторами поместили третий, плоскость главного сечения которого составляет угол $\alpha = 30^\circ$ с первым поляризатором. Какая часть естественного света проходит через такую систему? Потери, связанные с поглощением света, отсутствуют.

261. Вычислить энергию, излучаемую с поверхности Солнца, площадью 1 м^2 за одну секунду, приняв температуру его поверхности 5800 К. Считать, что Солнце излучает как абсолютно черное тело.

262. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела, равна 580 нм. Определить энергетическую светимость (излучательность) поверхности тела.

263. Найти длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности излучения, и диапазон электромагнитного спектра, к которому они относятся, для следующих случаев: 1) $T = 3 \text{ К}$ (приближенное значение температуры реликтового излучения, заполняющего Вселенную); 2) $T = 5800 \text{ К}$ (температуру поверхности Солнца); 3) $T = 310 \text{ К}$ (температура человеческого тела). Сравнить излучательные способности в этих случаях.

264. Температура поверхности звезды 12 000 К. Можно ли определить эту температуру по закону смещения Вина, если не пользоваться

спектральными приборами космических спутников? Земная атмосфера поглощает все лучи с длиной волны короче 290 нм.

265. Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 1300 до 1700 К. Насколько изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, и во сколько раз увеличилась максимальная излучательная способность?

266. Определить постоянную Планка h , если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности металла светом с частотой $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, полностью задерживаются потенциалом $U_1 = 6,6 \text{ В}$, а вырывающиеся светом с частотой $\nu_1 = 4,4 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, – потенциалом $U_1 = 16,5 \text{ В}$.

267. При освещении катода светом с длинами волн сначала $\lambda_1 = 440 \text{ нм}$, а затем $\lambda_2 = 680 \text{ нм}$ обнаружили, что запирающее напряжение уменьшилось в 3,3 раза. Определить работу выхода электронов.

268. Определить максимальные длины световых волн, при которых еще возможен фотоэффект из платины и цезия, если работы выхода электронов из этих металлов соответственно равны $A_1 = 6,3 \text{ эВ}$, $A_2 = 1,88 \text{ эВ}$.

269. На поверхность металла падает свет с длиной волны $\lambda = 0,10 \text{ мкм}$. Красная граница фотоэффекта $\lambda_0 = 0,30 \text{ мкм}$. Какая доля энергии падающего фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

270. На поверхность лития падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 3,100 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Определить работу выхода электронов из лития, если задерживающая разность потенциалов $U_3 = 1,7 \text{ В}$.

271. Найти длину волны де Бройля для электрона, летящего со скоростью $1,0 \cdot 10^8 \text{ см/с}$, и шарика массой $1,0 \text{ г}$, движущегося со скоростью $1,0 \text{ см/с}$. Нужно ли учитывать волновые свойства электрона и

шарика при анализе их взаимодействия с кристаллом? Расстояние между атомами в кристалле принять равным $d=0,70$ нм. Масса покоя электрона $m_0=9,1\cdot 10^{-31}$ кг.

272. Какую энергию нужно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от $\lambda_1=100$ нм до $\lambda_1=50$ нм?

273. Определить энергию и импульс электрона, имеющего длину волны де Бройля $\lambda=0,10$ нм. Масса покоя электрона $m_0=9,1\cdot 10^{-31}$ кг.

274. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов $U=200$ В, имеет длину волны де Бройля, равную $\lambda=0,0020$ нм. Найти массу этой частицы, если известно, что заряд ее численно равен заряду электрона.

275. Определить длину волны де Бройля для протона, кинетическая энергия которого равна энергии покоя электрона.

276. Свободный электрон в начальный момент времени локализован в области пространства с линейными размерами $\Delta x_0=0,1$ нм (порядок размера атома). Оценить область локализации Δx этого электрона спустя время $\Delta t=1$ с.

277. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину Δl одномерной потенциальной ямы, в которой минимальная энергия электрона $E_{\min}=10$ эВ.

278. Импульсный рубиновый лазер с выходной мощностью $N=2,0$ ГВт создает импульс длительностью $\tau=10$ нс. Оцените наибольшую точность $\Delta E/E$, с которой может быть определена энергия излучателя.

279. Время жизни τ возбужденного ядра порядка 1 нс, длина волны излучения $\lambda=0,1$ нм. С какой наибольшей точностью $\Delta E/E$ может быть определена энергия излучения?

280. Радиолокатор посылает импульс длительностью τ . Расстояние до удаленного объекта должно быть измерено с точностью до $\Delta x = 800$ м. Чему должна быть равна длительность импульса и какова должна быть ширина полосы частот $\Delta\omega$, которую должен пропускать усилитель приемника?

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТАБЛИЦЫ НЕКОТОРЫХ

ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Работа выхода электронов из металла

Металл	$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$
Калий	2,2
Литий	2,4
Натрий	2,5
Цезий	1,9
Цинк	4,0

Рубидий	1,5
Платина	6,3

Примечание. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

2. Заряд, масса и энергия покоя некоторых элементарных частиц и легких ядер

Частица	m_0 , кг	E_0 , МэВ	q , Кл
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,511	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	938	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Нейтрон	$1,68 \cdot 10^{-27}$	939	0
α -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	3733	$3,2 \cdot 10^{-19}$