МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

ФАКУЛЬТЕТ ВЕЧЕРНЕГО И ЗАОЧНОГО ОБУЧЕНИЯ

Л.М. Черных, А.В. Кочерыженков

ФИЗИКА

УСКОРЕННОЕ ОБУЧЕНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Часть 2

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2002

УДК 531

Л.М. Черных; А.В. Кочерыженков. Физика (ускоренное обучение): методические рекомендации и контрольные задания / СПбГУТ.- СПб, 2002. - Ч. 2.

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом университета.

Составлены в двух частях и предназначены для оказания помощи при выполнении контрольных работ. Часть 2 содержит программу изучения разделов: «Колебания», «Волны», «Волновая оптика», «Квантовая оптика», «Квантовая механика», литературу, примеры решения задач и задания для контрольной работы 2.

Ответственный редактор *А.Д. Андреев*
Рецензент *В.А. Подхалюзин*

Редактор *Л.А. Медведева*

ЛР № 020475 от 29.04.97. Подписано к печати 14.01.2002.
Объем 1, 5 усл. печ. л. Тираж 350 экз. Зак. 70.

РИО СПбГУТ. 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61
ООП Петербургкомстат. 193376 СПб, ул. проф. Попова, 39

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. Вариант контрольной работы, которую должен выполнить студент, совпадает с последней цифрой номера его зачетной книжки.

2. Каждую контрольную работу следует выполнять в отдельной тетради школьного типа.

3. Оформление каждой задачи следует начинать с новой страницы, оставляя поля для замечаний преподавателя.

4. Текст условия задачи необходимо переписывать полностью, без сокращений. К решениям задач следует давать пояснения.

5. Если при проверке работы преподавателем в ней обнаружены серьезные ошибки и на работе сделана пометка «На повторное рецензирование», нужно исправить ошибки и снова представить работу на проверку. Исправления делать в той же тетради, только в конце работы после заголовка «Работа над ошибками».

6. При наличии визы «Допущен к собеседованию» в контрольной работе следует исправить ошибки, указанные преподавателем, и представить ее на очное собеседование, которое осуществляется во время лабораторно-экзаменационной сессии. По результатам собеседования контрольная работа может быть зачтена.

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

При решении задач надо пользоваться приведенными ниже правилами и соблюдать указанную последовательность действий.

1. Записать краткое условие задачи (сразу после записи полного текста условия), вводя буквенные обозначения величин, указанных в условии задачи, и перевести эти величины в систему СИ.

2. Сделать (если нужно) чертеж, поясняющий содержание задачи.

3. Назвать физические законы и величины, которые описывают явления, указанные в условии задачи.

4. Используя математическую запись законов, установленных в п. 3, составить уравнение или систему уравнений, из которых могут быть определены искомые величины.

5. Из выписанных уравнений вывести расчетные формулы.

6. Провести вычисления, сохраняя 3 значащие цифры, указать единицы измерения.

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

КОЛЕБАНИЯ

1. Понятие о колебательных процессах. Гармонические колебания и их характеристики. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Представление гармонического колебания в виде вектора, вращающегося на плоскости.

2. Свободные гармонические колебания в механической системе. Упругая и квазиупругая колебательные системы: пружинный и математический маятники. Смещение, скорость, ускорение, энергия колеблющегося тела.

3. Свободные гармонические колебания в электрическом контуре. Заряд и напряжение на конденсаторе, ток в контуре, энергия колебаний. Формула Томсона.

4. Свободные затухающие колебания в механической системе и в электрическом контуре. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний, его решение. Коэффициент затухания, декремент затухания, логарифмический декремент, добротность.

5. Вынужденные колебания в механической системе и в электрическом контуре. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний, его решение. Зависимость амплитуды и фазы вынужденных колебаний от их частоты. Резонанс.

6. Сложение гармонических колебаний одного направления. Случай равных частот (метод векторных амплитуд). Случай близких частот (биения).

7. Сложение взаимно перпендикулярных гармонических колебаний.

ВОЛНЫ

1. Понятие о волновых процессах. Продольные и поперечные волны. Уравнение плоской бегущей гармонической волны. Характеристики волны. Длина волны. Волновой вектор. Фазовая скорость. Фронт волны. Волновые поверхности. Луч.

2. Колебательная скорость, относительная деформация и напряжение в упругой волне. Волновое уравнение Даламбера. Связь скорости волны с характеристиками среды.

3. Энергия упругой волны. Объемная плотность энергии в волне. Поток энергии. Плотность потока энергии и вектор Умова. Интенсивность волны.

4. Уравнение сферической волны.

5. Звуковые волны. Акустика. Скорость звука в газе. Звуковое давление и его связь с интенсивностью волны. Высота, тембр, громкость звука и их физические характеристики. Уровень интенсивности звука. Порог слышимости и порог болевого ощущения.

6. Эффект Доплера для упругих волн.

7. Электромагнитные волны. Волновое уравнение для электромагнитной волны. Уравнение плоской бегущей гармонической электромагнитной волны.

Скорость электромагнитных волн. Связь напряженностей электрического и магнитного полей в волне. Объемная плотность энергии, вектор Пойнтинга, поток энергии и их средние за период значения.

8. Принцип суперпозиции (наложения) волн. Когерентные волны. Интерференция волн. Условия возникновения максимума и минимума при интерференции.

9. Стоячие волны. Уравнение стоячей волны. Узлы и пучности. Собственные частоты колебаний натянутой струны.

10. Принцип Гюйгенса. Отражение и преломление волн на границе раздела сред. Дифракция волн.

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

1. Развитие представлений о природе света. Основные законы геометрической оптики. Показатель преломления. Оптический путь, оптическая разность хода. Принцип Ферма. Понятие об основных явлениях волновой оптики. Электромагнитная природа света.

2. Интерференция света. Условия образования максимумов и минимумов интенсивности при интерференции. Интерференция от двух когерентных источников. Интерференция при отражении от плоскопараллельной пластинки (тонкой пленки). Кольца Ньютона. Многолучевая интерференция.

3. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция на круглом отверстии. Дифракция на плоской щели в параллельных лучах. Дифракционная решетка. Угловая дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решетке. Понятие о голографии.

4. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризаторы. Закон Малюса. Поляризация при отражении от границы раздела двух диэлектриков. Закон Брюстера. Явление двойного лучепреломления. Явление вращения плоскости поляризации света.

5. Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсия. Электронная теория дисперсии. Фазовая и групповая скорости света.

КВАНТОВАЯ ОПТИКА

1. Тепловое излучение. Основные характеристики теплового излучения: поток излучения, интегральная (энергетическая) светимость, излучательная способность. Поглощательная способность (коэффициент поглощения). Серое тело. Абсолютно черное тело. Закон излучения Кирхгофа. Законы Стефана-Больцмана и Вина для излучения абсолютно черного тела. Невозможность объяснения законов теплового излучения на основе классической физики.

2. Квантовые гипотезы Планка и Эйнштейна. Фотоны. Энергия, импульс, масса и скорость фотона. Корпускулярно-волновая двойственность (дуализм) электромагнитного излучения.

3. Внешний фотоэффект. Уравнение фотоэффекта.

4. Световое давление. Его объяснение на основе квантовой теории.

5. Спектральные закономерности излучения атомарного водорода. Постулаты Бора. Расчет атома водорода согласно теории Бора. Энергетические уровни атома водорода и их связь со спектральными сериями излучения. Недостатки теории Бора.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

1. Гипотеза де Бройля. Опыты по дифракции микрочастиц.

2. Соотношения неопределенностей Гейзенберга. Противоречия между классическими и квантовомеханическими представлениями. Классическая механика как предельный случай квантовой механики для частиц большой массы.

3. Волновая функция. Ее физический смысл и свойства. Уравнение Шредингера. Нестационарные и стационарные состояния. Начальные и граничные условия. Собственные функции и собственные значения.

4. Частица в одномерной бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме. Энергетические уровни и распределение плотности вероятности в потенциальной яме. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект.

5. Атом водорода в квантовой механике. Квантовые числа. Принцип Паули.

6. Спонтанное и вынужденное излучение. Оптические квантовые генераторы.

7. Зонная теория твердых тел. Электрическая проводимость металлов и полупроводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1998. - Кн. 1,2,4,5.

2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1997.

3. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. - М.: Лаборатория базовых знаний, 1999.

4. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы. - М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

5. Дмитриева В.Ф., Прокофьев В.Л. Основы физики. - М.: Высш. шк., 2001.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 2

Примеры решения задач

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

1. Зависимость заряда колебательного контура от времени имеет вид $q(t)=0{,}5\sin(5\cdot10^5\pi\, t+\pi/6)$ мкКл. Емкость конденсатора равна 0,04 мкФ. Найти зависимость от времени напряжения на конденсаторе и силы тока в контуре, энергии электрического и магнитного полей колебательного контура.

Дано: $q(t)=0{,}5\sin(5\cdot10^5\pi\, t+\pi/6)$ мкКл $=5\cdot10^{-7}\sin(5\cdot10^5\pi t+\pi/6)$ Кл; $C=0{,}04$ мкФ $=4\cdot10^{-8}$ Ф.

Найти: $U(t), I(t), W_Э(t), W_M(t)$.

В контуре происходят свободные гармонические колебания. Зависимость заряда конденсатора от времени $q(t)=q_m\sin(\omega_0 t+\varphi_0)$. Из условия задачи находим амплитуду колебаний заряда $q_m=5\cdot10^{-7}$ Кл, циклическую частоту колебаний $\omega_0=5\cdot10^5\pi$ с$^{-1}$, начальную фазу колебаний $\varphi_0=\pi/6$ рад. Из формулы $\omega_0=1/\sqrt{LC}$, связывающей частоту свободных колебаний контура с его параметрами, найдем индуктивность контура $L=\dfrac{1}{\omega_0^2 C}=\dfrac{1}{(5\cdot10^5\pi)^2\cdot4\cdot10^{-8}}=10^{-5}$ Гн.

Напряжение на конденсаторе связано с его зарядом

$$U(t)=\frac{q(t)}{C}=\frac{q_m}{C}\sin(\omega_0 t+\varphi_0)=U_m\sin(\omega_0 t+\varphi_0).$$

Подставляя значения, получаем

$$U(t)=\frac{5\cdot10^{-7}}{4\cdot10^{-8}}\cdot\sin(5\cdot10^5\pi t+\pi/6)\,\text{В}=12{,}5\cdot\sin(5\cdot10^5\pi t+\pi/6)\,\text{В}.$$

Сила тока в контуре

$$I=\frac{dq}{dt}=0{,}25\pi\cdot\cos(5\cdot10^5\pi t+\pi/6)\ \text{А}.$$

Амплитуда колебаний силы тока

$$I_m=\omega_0 q_m=0{,}25\pi\ \text{А}.$$

Полная энергия колебательного контура W складывается из энергии электрического поля и энергии магнитного поля контура: $W=W_Э(t)+W_M(t)$.

Она связана с амплитудами колебаний других величин: $W=\dfrac{q_m^2}{2C}=\dfrac{CU_m^2}{2}=\dfrac{LI_m^2}{2}$.

Проведем расчет:

$$W=LI_m^2/2=10^{-5}\cdot(0{,}25\pi)^2/2=3{,}125\cdot10^{-6}\ \text{Дж}.$$

Энергия электрического поля контура

$$W_Э(t)=\frac{CU^2(t)}{2}=\frac{q^2(t)}{2C}=W\cdot\sin^2\varphi(t), \tag{1}$$

где $\varphi(t)=\omega_0 t+\varphi_0$ - фаза колебаний.

Энергия магнитного поля контура $W_M(t) = \frac{LI^2(t)}{2} = W \cdot \cos^2\varphi(t)$. (2)

Подставляя значение W в формулы (1) и (2), находим

$W_Э(t) = 3{,}125 \cdot 10^{-6} \sin^2(5 \cdot 10^5 \pi t + \pi/6)$ Дж, $W_M(t) = 3{,}125 \cdot 10^{-6} \cos^2(5 \cdot 10^5 \pi t + \pi/6)$ Дж.

2. Участок цепи состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений Z_1 и Z_2 (рис.1), напряжения на которых изменяются по закону: $U_1 = 20\sin(10^3\pi t + \pi/6)$ В, $U_2 = 30\sin(10^3\pi t + \pi/3)$ В. Написать уравнение колебаний напряжения $U(t)$ на участке цепи. Построить векторную диаграмму складываемых напряжений.

Дано: $U_1 = 20\sin(10^3\pi t + \pi/6)$ В, $U_2 = 30\sin(10^3\pi t + \pi/3)$ В. Найти: $U(t)$.

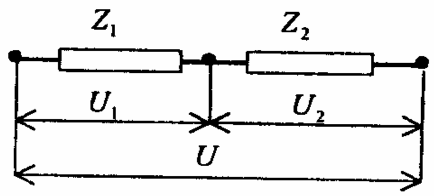

Рис. 1

Напряжение на участке цепи $U(t) = U_1(t) + U_2(t)$ можно рассматривать как сумму двух гармонических колебаний одинаковой частоты и одного направления. Результатом сложения таких колебаний является гармоническое колебание той же частоты $\omega = 10^3\pi$ с$^{-1}$,

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

амплитуда U_m и начальная фаза φ_0 которого связаны с амплитудами складываемых колебаний $U_{m1} = 20$ В, $U_{m2} = 30$ В и их начальными фазами $\varphi_{01} = \pi/6$, $\varphi_{02} = \pi/3$ соотношениями $U_m = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + 2U_{m1}U_{m2}\cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}$,

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{U_{m1}\sin\varphi_{01} + U_{m2}\sin\varphi_{02}}{U_{m1}\cos\varphi_{01} + U_{m2}\cos\varphi_{02}}.$$

Подставим численные значения величин и проведем расчет:

$U_m = \sqrt{20^2 + 30^2 + 2 \cdot 20 \cdot 30 \cdot \cos(\pi/3 - \pi/6)} = 48{,}4$ В; $\operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{20 \cdot 0{,}5 + 30 \cdot 0{,}866}{20 \cdot 0{,}866 + 30 \cdot 0{,}5} = 1{,}11$.

Найденное значение $\operatorname{tg}\varphi_0$ соответствует $\varphi_0 = 48° = 0{,}837$ рад.

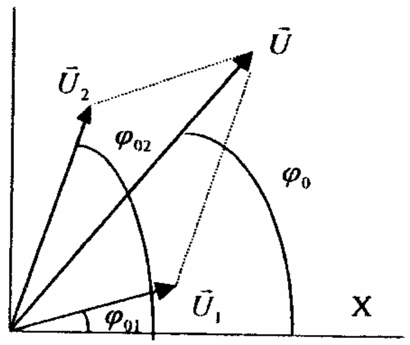

Рис. 2

Подставляя значения U_m, φ_0 и ω в уравнение (1), получаем уравнение колебаний напряжения на рассматриваемом участке цепи:

$U(t) = 48{,}4 \cdot \sin(10^3\pi t + 0{,}837)$ В.

Векторная диаграмма для момента времени $t = 0$ показана на рис.2. Вектора $\vec{U}_1$ и $\vec{U}_2$ представляют складываемые колебания U_1 и U_2. Длины этих векторов пропорциональны амплитудам U_{m1} и U_{m2} соответствующих колебаний, а углы между этими векторами и осью X равны начальным фазам колебаний. Вектор $\vec{U}$ представляет результирующее колебание. Длина этого вектора пропорциональна амплитуде U_m результирующего колебания, а угол между вектором $\bar{U}$ и осью X равен начальной фазе φ_0 результирующего колебания.

3. Мощность источника гармонических звуковых сферических волн $P = 1{,}256$ Вт, частота колебаний $\nu = 2$ кГц. Плотность воздуха $\rho = 1{,}3$ кг/м^3, его температура $t^\circ = 17\,^\circ$С, масса одного моля $M = 29$ г/моль. Найти скорость и длину волн, излучаемых источником, период колебаний частиц среды. Написать уравнение волны. Найти энергию, переносимую волной за одну минуту через площадку $S = 100$ см^2. Площадка перпендикулярна направлению распространения волны и находится от источника на расстоянии r_1, на котором уровень интенсивности волны $L(r_1) = 70$ дБ. Определить плотность звуковой энергии и амплитуду акустического давления на этом расстоянии.

Дано: $P = 1{,}256$ Вт; $\nu = 2$ кГц $= 2\cdot 10^3$ Гц; $\rho = 1{,}3$ кг/м^3; $t^\circ = 17\,^\circ$С; $T_A = 290$ К; $M = 29$ г/моль $= 2{,}9\cdot 10^{-2}$ кг/моль; $\Delta t = 1$ мин $= 60$ с; $S = 100$ см$^2 = 10^{-2}$ м^2; $L(r_1) = 70$ дБ. Найти: $V, \lambda, T, x(t,r), W, w(r_1), p_{AK}(r_1)$.

Скорость звуковых волн в газе

$$V = \sqrt{\frac{\gamma R T_A}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p}{\rho}}, \tag{1}$$

где $\gamma = C_P / C_V$ - отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме; для воздуха $\gamma = 1{,}4$; $R = 8{,}3$ Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная; T_A - температура по шкале Кельвина; p - давление газа.

Расчет по формуле (1) дает: $V = \sqrt{1{,}4\cdot 8{,}3\cdot 290/(2{,}9\cdot 10^{-2})} = 341$ м/с. Период колебаний частиц среды $T = 1/\nu = 1/(2\cdot 10^3) = 5\cdot 10^{-4}$ с. Длина волны $\lambda = V\cdot T = 341\cdot 5\cdot 10^{-4} = 0{,}17$ м.

Уравнение сферической волны

$$x(t,r) = \frac{A_0\cdot r_0}{r}\sin\omega\left(t - \frac{r}{V}\right) = \frac{A_0\cdot r_0}{r}\sin(\omega t - kr), \tag{2}$$

где $x(t,r)$ - смещение частиц среды от их положения равновесия в момент времени t на расстоянии r от источника волн, $A(r) = A_0\cdot r_0/r$ - амплитуда волны, A_0 - амплитуда волны на произвольном расстоянии r_0 от источника, ω - циклическая частота, k - волновое число. Величина $\varphi(t,r) = \omega(t - r/V) = \omega t - kr$ называется фазой волны.

Чтобы написать уравнение волны, надо численные значения A_0, r_0, ω, V или k подставить в равенство (2). Циклическая частота $\omega = 2\pi\nu = 2\pi\cdot 2\cdot 10^3 = 4\pi\cdot 10^3$ с$^{-1}$, волновое число $k = 2\pi/\lambda = 2\pi/0{,}17 = 37$ м$^{-1}$. Учтем, что интенсивность сферической волны на расстоянии r от источника

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}. \tag{3}$$

Взяв $r = r_0 = 1$ м, получаем $I(r_0) = 1{,}256/(4\pi\cdot 1^2) = 0{,}1$ Вт/м^2.

Интенсивность связана с амплитудой A соотношением

$$I = \frac{1}{2}\rho\omega^2 A^2 V. \tag{4}$$

Амплитуда A_0 на расстоянии r_0 от источника равна $A_0 = \sqrt{2I(r_0)/(\rho \cdot V)}/\omega = \sqrt{2 \cdot 0{,}1/(1{,}3 \cdot 341)}/(4\pi \cdot 10^3) = 1{,}69 \cdot 10^{-6}$ м. Подставив найденные значения величин в уравнение (2), получаем уравнение волны

$$x(t,r) = \frac{1{,}69 \cdot 10^{-6}}{r}\sin 4\pi \cdot 10^3 (t - \frac{r}{341}) = \frac{1{,}69 \cdot 10^{-6}}{r}\sin(4\pi \cdot 10^3 t - 37r) \text{ м}.$$

Уровнем интенсивности называется величина

$$L = 10\lg\frac{I}{I_0}, \tag{5}$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2 - интенсивность, соответствующая порогу слышимости.

Отсюда находим интенсивность на расстоянии r_1 от источника

$$I(r_1) = I_0 \cdot 10^{L(r_1)/10} = 10^{-12} \cdot 10^{70/10} = 10^{-5} \text{ Вт/м}^2. \tag{6}$$

Интенсивность - это энергия, переносимая волной за единицу времени через единицу площади, поэтому энергия, переносимая волной за время Δt через поверхность площадью S,

$$W = I(r_1) \cdot S \cdot \Delta t = 10^{-5} \cdot 10^{-2} \cdot 60 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}. \tag{7}$$

Плотность звуковой энергии w (энергия, заключенная в единице объема) связана с интенсивностью волны соотношением

$$I = w \cdot V. \tag{8}$$

Плотность энергии на расстоянии r_1 от источника

$$w(r_1) = I(r_1)/V = 10^{-5}/341 = 2{,}93 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/м}^3.$$

Амплитуда акустического давления p_{AK} связана с интенсивностью волны

$$p_{AK} = \sqrt{2I \cdot \rho \cdot V}. \tag{9}$$

На расстоянии r_1 от источника

$$p_{AK}(r_1) = \sqrt{2I(r_1) \cdot \rho \cdot V} = \sqrt{2 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}3 \cdot 341} = 9{,}42 \cdot 10^{-2} \text{ Па}.$$

Примечание. В задачах с плоскими волнами формулы (1), (4) - (9) сохраняют свой вид.

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

4. Луч естественного света падает под углом Брюстера $\alpha_Б$ на поверхность диэлектрика. Отраженный луч, интенсивность которого $I_1 = 0{,}4$ Вт/см^2, проходит через поляризатор Р (рис.3). При этом его интенсивность уменьшается до значения $I_2 = 0{,}3$ Вт/см^2. Найти угол φ между плоскостью падения луча на диэлектрик и плоскостью поляризации луча (плоскостью, содержащей луч и направление колебаний вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$), вышедшего из поляризатора. Потерями в поляризаторе пренебречь.

Дано: $I_1 = 0{,}4$ Вт/см$^2 = 4 \cdot 10^3$ Вт/м^2; $I_2 = 0{,}3$ Вт/см$^2 = 3 \cdot 10^3$ Вт/м^2. Найти φ.

При падении света под углом Брюстера направление колебаний вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ в отраженном луче перпендикулярно плоскости падения (рис.3).

Интенсивность I_1 плоскополяризованного луча, падающего на поляризатор, связана с интенсивностью I_2 луча, вышедшего из поляризатора, законом Малюса:

$$I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \alpha , \qquad (1)$$

где α - угол между плоскостью поляризации луча, падающего на поляризатор, и плоскостью поляризации луча, вышедшего из поляризатора. Последняя плоскость называется также плоскостью пропускания поляризатора.

Из равенства (1) находим

$$\cos\alpha = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} = \sqrt{\frac{3\cdot 10^3}{4\cdot 10^3}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Следовательно, $\alpha = 30^\circ$ и $\varphi = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$.

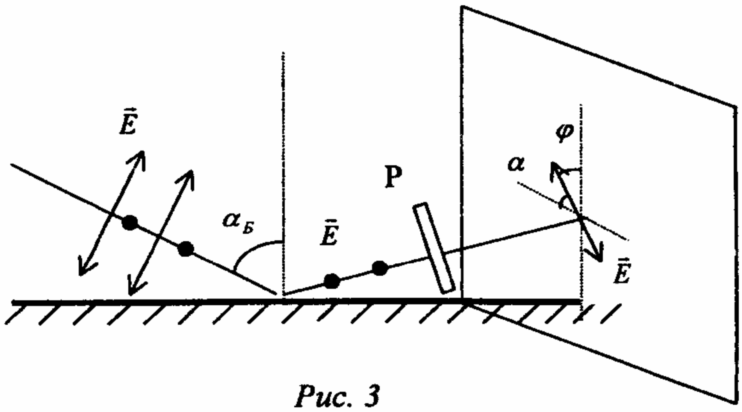

Рис. 3

5. На экране Э наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников S_1 и S_2 (щелей) (рис.4). Щели и экран перпендикулярны плоскости рисунка. Расстояние между щелями $d_1 = 0{,}8$ мм, расстояние от щелей до экрана $\ell_1 = 2$ м, длина волны света $\lambda = 4000$ Å. Экран удалили на расстояние $\ell_2 = 3$ м от щелей. На какую величину ΔN изменилось число интерференционных полос на отрезке $a = 1$ см на экране? Какое расстояние d_2 надо установить между щелями, чтобы ширина интерференционной полосы осталась прежней?

Дано: $d_1 = 0{,}8$ мм $= 8\cdot 10^{-4}$ м; $\lambda = 4000$ Å $= 4\cdot 10^{-7}$ м; $\ell_1 = 2$ м; $\ell_2 = 3$ м; $a = 1$ см $= 1\cdot 10^{-2}$ м. Найти: ΔN, d_2.

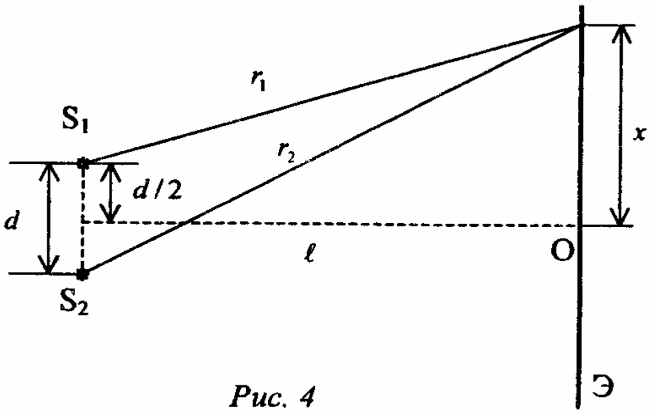

Рис. 4

Результирующая интенсивность на экране в точке наблюдения с координатой x зависит от оптической разности хода (рис.4). Когда показатель преломления среды $n=1$, оптическая разность хода совпадает геометрической и равна $\Delta L = r_2 - r_1 \approx x \cdot d/\ell$, где x - координата точки наблюдения относительно центра O интерференционной картины (рис.4). При $\Delta L = m\lambda$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$, будет иметь место максимум интенсивности.

Следовательно, координаты максимумов на экране удовлетворяют условию

$$x_m = m\frac{\lambda \cdot \ell}{d}, \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \tag{1}$$

Отсюда получаем, что ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними максимумами или соседними минимумами)

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot \ell}{d}. \tag{2}$$

Следовательно, до перемещения экрана $\Delta x_1 = \lambda \cdot \ell_1 / d_1 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 2/(8 \cdot 10^{-4}) = 10^{-3}$ м. Число интерференционных полос на отрезке шириной a равно $N_1 = a/\Delta x_1 = 0{,}01/10^{-3} = 10$.

После перемещения экрана $\Delta x_2 = \lambda \cdot \ell_2 / d_1 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 3/(8 \cdot 10^{-4}) = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м. При этом число полос на том же отрезке экрана $N_2 = a/\Delta x_2 = 0{,}01/(1{,}5 \cdot 10^{-3}) \approx 6{,}7$.

Таким образом, число полос уменьшилось на $\Delta N = N_1 - N_2 = 10 - 6{,}7 = 3{,}3$ полосы.

Как видно из равенства (2), увеличение расстояния ℓ от щелей до экрана приводит к увеличению Δx, а увеличение расстояния d между щелями приводит к уменьшению ширины полосы. Следовательно, чтобы возвратить прежнюю ширину полосы, надо увеличить расстояние d.

Условие равенства ширины полос

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot \ell_1}{d_1} = \frac{\lambda \cdot \ell_2}{d_2}.$$

Из этого равенства находим $d_2 = d_1 \cdot \ell_2 / \ell_1 = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 3/2 = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ м.

6. От точечного источника света S на круглое отверстие радиусом $r = 1$ мм падает монохроматическая сферическая световая волна ($\lambda = 0{,}5$ мкм). Источник S находится на оси отверстия на расстоянии $a = 1$ м от него (рис.5). Точка наблюдения A сначала находилась на расстоянии $b_1 = 0{,}5$ м от отверстия, после чего ее переместили вдоль оси отверстия на очень большое расстояние

($b_2 \to \infty$). Сколько раз (N) при таком перемещении в точке наблюдения имел место максимум интенсивности света? Найти расстояния от отверстия до точек, в которых наблюдался максимум интенсивности.

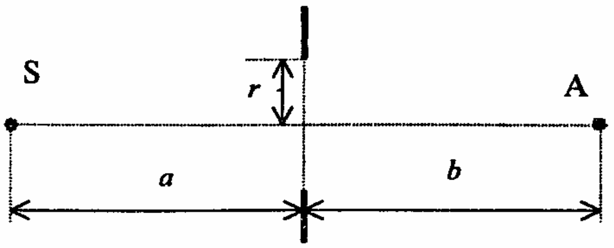

Рис. 5

Дано: $r = 1 мм = 10^{-3}$ м;
$\lambda = 0{,}5$ мкм $= 5 \cdot 10^{-7}$ м;
$a = 1$ м; $b_1 = 0{,}5$ м; $b_2 \to \infty$.
Найти: N, b.

Интенсивность света в точке наблюдения зависит от числа зон Френеля, укладывающихся в отверстии. Если источник S сферической волны и точка наблюдения A находятся на оси отверстия, то число зон Френеля в отверстии

$$m = \frac{r^2(a+b)}{\lambda \cdot a \cdot b}. \tag{1}$$

Исходя из принципа Гюйгенса-Френеля, зоны Френеля можно рассматривать как источники вторичных волн. Волны, приходящие в точку наблюдения A от соседних зон Френеля, имеют разность хода, равную $\lambda/2$, и поэтому гасят друг друга. Следовательно, если в отверстии укладывается четное число зон Френеля, то в точке A будет минимум интенсивности (интенсивность будет близка к нулю). Если же в отверстии укладывается нечетное число зон Френеля, то волна, приходящая в точку наблюдения от одной из зон, останется непогашенной и в точке A будет наблюдаться максимум интенсивности. Если в отверстии укладывается нецелое число зон, то интенсивность в точке A будет промежуточной между минимальной и максимальной.

В рассматриваемом случае при первом положении точки A $m_0 = 10^{-6}(1+0{,}5)/(5 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 0{,}5) = 6$. Следовательно, в точке A имеет место минимум интенсивности света. Когда точка A удаляется далеко от отверстия ($b \to \infty$), тогда в числителе равенства (1) величиной a можно пренебречь по сравнению с величиной b и (1) принимает вид

$$m = \frac{r^2}{\lambda \cdot a}. \tag{2}$$

Число зон Френеля в отверстии в этом случае $m_\infty = 10^{-6}/(5 \cdot 10^{-7} \cdot 1) = 2$. Таким образом, если точка A будет далеко от отверстия, то в ней будет наблюдаться минимум интенсивности.

При перемещении точки A из начального положения в конечное имели место такие расстояния b, при которых $m_1 = 5$ и $m_2 = 3$. Следовательно, при перемещении точки A максимумы интенсивности имели место 2 раза: $N = 2$.

Выразим величину b из равенства (1):

$$b = \frac{r^2 \cdot a}{m \cdot \lambda \cdot a - r^2}. \tag{3}$$

В случае $m_1 = 5$ получаем $b_1 = (10^{-6} \cdot 1)/(5 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 1 - 10^{-6}) = 0{,}67$ м.

В случае $m_2 = 3$ получаем $b_2 = (10^{-6} \cdot 1)/(3 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 1 - 10^{-6}) = 2$ м.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

7. Абсолютно черное тело с площадью поверхности $S_1 = 10$ см^2 окружено замкнутой оболочкой. Внутренняя поверхность этой оболочки площадью $S_2 = 200$ см^2 представляет собой серое тело с поглощательной способностью (коэффициентом поглощения) $a = 0{,}1$. Тела находятся в состоянии термодинамического равновесия. Абсолютно черное тело за промежуток времени $\Delta t_1 = 2$ мин. излучает энергию $W_1 = 6{,}8$ кДж. Найти мощность, излучаемую внутренней поверхностью оболочки. Определить длину волны, на которую приходится максимум излучательной способности этой поверхности.

Дано: $S_1 = 10\,\text{см}^2 = 10^{-3}\,\text{м}^2$; $S_2 = 200\,\text{см}^2 = 2 \cdot 10^{-2}\,\text{м}^2$; $a = 0{,}1$; $\Delta t_1 = 2$ мин. $= 120$ с; $W_1 = 6{,}8$ кДж $= 6{,}8 \cdot 10^3$ Дж. Найти: P, λ_m.

Согласно определению, интегральная (энергетическая) светимость любого тела $R = W/(S \cdot \Delta t)$, где W - энергия, излучаемая с площади S этого тела за промежуток времени Δt. Подставляя значения W_1, S_1 и Δt_1, находим интегральную светимость абсолютно черного тела $R_e = 6{,}8 \cdot 10^3/(10^{-3} \cdot 120) = 5{,}67 \cdot 10^4$ Вт/м^2.

По закону Стефана-Больцмана:

$$R_e = \sigma T_e^4, \tag{1}$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) - постоянная Стефана-Больцмана, T_e - температура абсолютно черного тела.

Таким образом, $T_e = \sqrt[4]{R_e/\sigma} = \sqrt[4]{5{,}67 \cdot 10^4/(5{,}67 \cdot 10^{-8})} = 1000$ К.

Температуры тел, находящихся в термодинамическом равновесии, одинаковы. Следовательно, температура оболочки $T = T_e = 1000$ К.

Излучательная способность r любого тела, в данном случае внутренней поверхности оболочки, связана с поглощательной способностью a этого тела и излучательной способностью r_e абсолютно черного тела законом излучения Кирхгофа

$$\frac{r}{a} = r_e, \tag{2}$$

где все три величины берутся при одинаковой длине волны и температуре.

Тело называется серым, если его поглощательная способность a не зависит от длины волны, поэтому интегральная светимость $R = \int_0^\infty r\,d\lambda$ таких тел связана с интегральной светимостью абсолютно черного тела соотношением

$$R = a \cdot R_e. \tag{3}$$

Таким образом, интегральная светимость оболочки

$$R = 0{,}1 \cdot 5{,}67 \cdot 10^4 = 5{,}67 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Мощность, излучаемая оболочкой, $P = R \cdot S_2 = 5{,}67 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 113{,}4$ Вт.

Для абсолютно черных и серых тел выполняется закон смещения Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \qquad (4)$$

где λ_m - длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности тела, T - температура тела, $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ (м К) - постоянная Вина.

Следовательно, для внутренней поверхности оболочки (как и для помещенного внутри нее абсолютно черного тела) $\lambda_m = 2{,}9 \cdot 10^{-3} / 10^3 = 2{,}9 \cdot 10^{-6}$ м.

8. Монохроматический свет, падающий на поверхность цезия, вызывает фотоэффект. Увеличение частоты падающего света на величину $\Delta\nu = 7 \cdot 10^{13}$ Гц привело к изменению задерживающей разности потенциалов в 1,2 раза. Работа выхода электронов из цезия $A = 1{,}8$ эВ.

Найти: красную границу фотоэффекта, а также задерживающую разность потенциалов, максимальную скорость выбиваемых из цезия электронов и импульс фотонов для начальной частоты.

Дано: $A = 1{,}8$ эВ $= 2{,}88 \cdot 10^{-19}$ Дж; $\Delta\nu = 7 \cdot 10^{13}$ Гц; $U_{З2} = 1{,}2 \cdot U_{З1}$.

Найти: $\lambda_{КР}, U_{З1}, V_{m1}, p_1$.

Из закона сохранения энергии следует уравнение фотоэффекта:

$$\varepsilon = A + W_m. \qquad (1)$$

Здесь $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$ - энергия фотона, $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν и λ - соответственно частота и длина волны света, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света, $A = hc/\lambda_{КР}$ - работа выхода электронов из вещества, $\lambda_{КР}$ - красная граница фотоэффекта (фотоэффект имеет место, если $\lambda \le \lambda_{КР}$), $W_m = mV_m^2/2 = eU_З$ - максимальная энергия фотоэлектронов, V_m - их максимальная скорость, $U_З$ - задерживающая разность потенциалов, $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг - масса электрона, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл - модуль его заряда.

Найдем красную границу для цезия

$$\lambda_{КР} = \frac{hc}{A} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2{,}88 \cdot 10^{-19}} = 6{,}9 \cdot 10^{-7}\ \text{м}.$$

Напишем уравнения фотоэффекта, вызванного первоначальным излучением с частотой ν_1 и излучением с частотой $\nu_1 + \Delta\nu$:

$$h\nu_1 = A + eU_{З1}\ , \qquad (2)$$

$$h(\nu_1 + \Delta\nu) = A + 1{,}2 \cdot eU_{З1}\ . \qquad (3)$$

Получили систему двух уравнений с двумя неизвестными ν_1 и $U_{З1}$. Вычитая уравнение (2) из уравнения (3), получаем $h \cdot \Delta\nu = 0{,}2eU_{З1}$. Отсюда

$U_{З1} = h \cdot \Delta\nu/(0{,}2e) = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 7 \cdot 10^{13}/(0{,}2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}) = 1{,}45$ В.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, выбитых светом с частотой ν_1: $W_{m1} = eU_{З1} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}45 = 2{,}32 \cdot 10^{-19}$ Дж $= 1{,}45$ эВ. Их максимальная скорость $V_{m1} = \sqrt{2 \cdot W_{m1}/m} = \sqrt{2 \cdot 2{,}32 \cdot 10^{-19}/(9{,}1 \cdot 10^{-31})} = 7{,}14 \cdot 10^5$ м/с.

Энергия фотона с частотой ν_1: $\varepsilon_1 = A + W_{m1} = 1{,}8 + 1{,}45 = 3{,}25$ эВ $=$ $= 5{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж. Импульс этого фотона $p_1 = \varepsilon_1/c = 5{,}2 \cdot 10^{-19}/(3 \cdot 10^8) = 1{,}73 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.

9. Электрон находится в атоме водорода на третьем энергетическом уровне. Атом поглощает фотон с энергией $\varepsilon = 10$ эВ. Найти энергию электрона после поглощения атомом фотона и отношение длин волн де Бройля электрона в конечном и начальном состояниях.

Дано: $n=3$; $\varepsilon=10$ эВ$=1{,}6\cdot10^{-18}$ Дж. Найти: E, $\lambda_Б/\lambda_{Бn}$.

Согласно теории Бора, импульс электрона $p=mV$ (m - масса электрона, V - его скорость) в атоме водорода связан с радиусом орбиты r, по которой электрон движется, соотношением

$$p\cdot r=n\cdot\hbar, \tag{1}$$

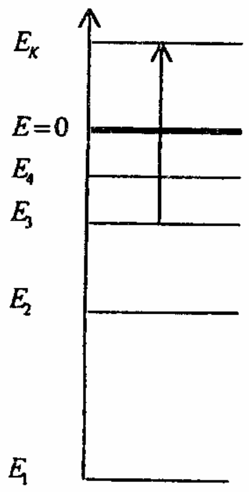

Рис. 6

где $\hbar=h/2\pi$, $h=6{,}6\cdot10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, величина $n=1,2,3...$ называется квантовым числом.

При движении электрона вокруг ядра по окружности на электрон действует сила Кулона и второй закон Ньютона принимает вид

$$m\frac{V^2}{r}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{e^2}{r^2}\ , \tag{2}$$

где ε_0 - электрическая постоянная, e - модуль заряда электрона. Система уравнений (1) и (2) позволяет определить все характеристики электрона в атоме. В частности, для полной энергии электрона E_n в состоянии, которому соответствует квантовое число n, и для его кинетической энергии E_{Kn} в этом состоянии получаются выражения (смотри учебник):

$$E_n=\frac{E_1}{n^2}=-\frac{h\cdot c\cdot R}{n^2} \qquad (3), \qquad\qquad E_{Kn}=\frac{p_n^2}{2m}=|E_n|. \qquad (4)$$

Здесь E_1 - энергия электрона в состоянии с $n=1$, $c=3\cdot10^8$ м/с - скорость света, $R=\dfrac{m\cdot e^4}{8\cdot\varepsilon_0^2\cdot h^3\cdot c}=1{,}1\cdot10^7$ м$^{-1}$- постоянная Ридберга, p_n - импульс электрона.

При этом квантовое число n является номером энергетического уровня. На рис.6 приведена энергетическая диаграмма атома водорода (показаны только первые 4 энергетических уровня). Область энергий $E<0$ соответствует электрону, находящемуся в атоме. При этом состояние с энергией E_1 называется основным или невозбужденным. Область энергий $E>0$ соответствует электрону, выбитому из атома.

При передаче атому энергии ε (например, при поглощении атомом фотона) согласно закону сохранения энергии энергия электрона E возрастает на эту величину

$$E=E_n+\varepsilon. \tag{5}$$

При этом если $\varepsilon<|E_n|$, то электрон остается в атоме, переходя на один из вышерасположенных уровней. Если $\varepsilon=|E_n|$, то электрон будет выбит из атома, а его кинетическая энергия станет равной нулю (состояние $E=0$ на диаграмме). В частности, минимальная энергия E_i, необходимая для удаления из атома электрона, находящегося на первом энергетическом уровне, называется энергией ионизации:

$$E_i = |E_1| = h \cdot c \cdot R = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8} \cdot 1{,}1 \cdot 10^{7} = 2{,}18 \cdot 10^{-18}\text{Дж} = 13{,}6 \text{ эВ}. \qquad (6)$$

Если же $\varepsilon > |E_n|$, то электрон будет выбит из атома и будет обладать кинетической энергией $E = E_K$ (рис.6).

В данной задаче $E_n = E_1 / n^2 = -13{,}6/9 = -1{,}5$ эВ, т.е. $\varepsilon = 10$ эВ $> |E_n|$. Поэтому электрон будет выбит из атома и получит при этом кинетическую энергию $E = E_K = E_n + \varepsilon = -1{,}5 + 10 = 8{,}5$ эВ $= 13{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Длина волны де Бройля частицы $\lambda_Б = \dfrac{h}{p}$. (7)

С учетом формул (4) и (7) найдем отношение длин волн де Бройля в конечном и начальном состояниях

$$\frac{\lambda_Б}{\lambda_{Бn}} = \frac{p_n}{p} = \sqrt{\frac{2mE_{Kn}}{2mE_K}} = \sqrt{\frac{E_{Kn}}{E_K}} = \sqrt{\frac{|E_n|}{E_K}} = \sqrt{\frac{1{,}5}{8{,}5}} = 0{,}42.$$

Примечание. При решении задач полезно иметь в виду следующее.

1. При переходе электрона с уровня с номером n_1 на нижележащий уровень с номером n_2 его энергия уменьшается на величину

$$\varepsilon = E_{n1} - E_{n2} = |E_1| \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right). \qquad (8)$$

Эту энергию уносит фотон, излучаемый атомом.

2. Переход электрона с данного уровня в основное состояние ($n = 1$) возможен различными способами. Например, переход с 3-го уровня может быть осуществлен двумя способами: в первом случае сразу происходит переход с 3-го уровня на 1-й, во втором случае происходит сначала переход с 3-го уровня на 2-й, затем - со 2-го на 1-й.

ЗАДАЧИ

В таблице приведены варианты задач контрольной работы 2 (например, студент, выполняющий вариант 5, должен решить задачи 5, 6, 12, 18, 24, 30, 31, 37, 43).

Вариант	Задачи								
0	1	6	11	16	21	26	31	36	41
1	2	7	12	17	22	27	32	37	42
2	3	8	13	18	23	28	33	38	43
3	4	9	14	19	24	29	34	39	44
4	5	10	15	20	25	30	35	40	45
5	5	6	12	18	24	30	31	37	43
6	1	7	13	19	25	26	32	38	44
7	2	8	14	20	21	27	33	39	45
8	3	9	15	16	22	28	34	40	41
9	4	10	11	17	23	29	35	36	42

1. Зависимость напряжения на обкладках конденсатора от времени при свободных колебаниях в колебательном контуре имеет вид $U = 20\sin(10^5 \pi t + \pi/4)$ В. Индуктивность катушки контура $L = 0{,}1$ мГн.

Найти зависимость силы тока в контуре от времени. Начертить графики зависимости от времени энергии электрического поля конденсатора, энергии магнитного поля катушки и полной энергии в пределах одного периода.

2. Зависимость силы тока в контуре от времени при свободных колебаниях имеет вид $I = 3{,}14 \cdot 10^{-2} \cos(5 \cdot 10^4 \pi t - \pi/4)$ А. Емкость конденсатора контура $C = 0{,}1$ мкФ. Найти зависимость напряжения на конденсаторе от времени. Начертить графики зависимости от времени в пределах одного периода энергии электрического поля, энергии магнитного поля и полной энергии контура.

3. Энергия колебательного контура $W = 2$ мкДж, его индуктивность $L = 0{,}04$ мГн. Напряжение на конденсаторе в начальный момент времени равно максимальному значению $U_m = 0{,}4$ В. Найти зависимость заряда конденсатора от времени в режиме свободных колебаний. Начертить графики зависимости от времени в пределах одного периода энергий электрического и магнитного полей, а также полной энергии контура. Затуханием пренебречь. При решении задачи для упрощения расчетов взять $\sqrt{10} \approx \pi$, $1/\sqrt{10} \approx 0{,}1\pi$.

4. В контуре происходят свободные гармонические колебания.
В начальный момент времени напряжение на конденсаторе находилось в стадии нарастания и равнялось $U(t = 0) = 5$ В, что составляло половину амплитудного значения. Амплитуда силы тока в контуре $I_m = 0{,}1$ А, индуктивность контура $L = 0{,}01$ мГн. Пренебрегая затуханием, найти зависимость от времени энергий электрического и магнитного полей контура, а также полную энергию контура.

5. Индуктивность катушки контура $L = 0{,}4$ мГн, емкость его конденсатора $C = 1$ мкФ. В контуре происходят свободные колебания. Заряд конденсатора в начальный момент времени $t = 0$ находился в стадии нарастания и равнялся половине амплитудного значения. В некоторый момент времени t_0 заряд на конденсаторе и сила тока в контуре равны соответственно $q(t_0) = 0{,}2$ мкКл, $I(t_0) = 20$ мА. Пренебрегая затуханием, найти зависимость от времени энергий электрического и магнитного полей контура.

6. Колебания, совершаемые частицами воздуха в точке наблюдения при прохождении звуковых волн, излучаемых первым и вторым источниками, описываются уравнениями: $x_1 = \sin 10^3 \pi t$ мкм, $x_2 = 2\sin(10^3 \pi t + \frac{2}{3}\pi)$ мкм.

Написать уравнение результирующего колебания, если через точку наблюдения обе волны проходят в одном направлении. Построить векторную диаграмму складываемых колебаний.

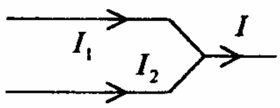

Рис. 7

7. Уравнения колебаний токов, втекающих в узел электрической схемы (рис.7), имеют вид: $I_1 = 8\sin(800\pi t + \pi/4)$ мА, $I_2 = 6\sin(800\pi t + 3\pi/4)$ мА. Написать уравнение колебаний тока I, вытекающего из этого узла. Построить векторную диаграмму складываемых колебаний.

8. В точку наблюдения приходят сигналы от двух антенн так, что напряженности полей имеют вид $E_1 = 40\sin(10^6 \pi t + \pi/6)$ мкВ/м, $E_2 = 30\sin(10^6 \pi t + \pi/2)$ мкВ/м. Найти зависимость от времени напряженности поля результирующего сигнала, если оба вектора $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ совершают колебания вдоль одного направления. Построить векторную диаграмму складываемых колебаний.

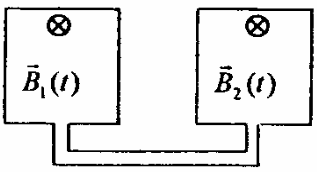

Рис. 8

9. Два электромагнита создают магнитные поля, магнитные индукции которых описываются уравнениями: $B_1 = 0{,}1\cos 100\pi t$ Тл, $B_2 = 0{,}05\cos(100\pi t + \pi/4)$ Тл.

Имеются две одинаковые рамки (рис. 8) каждая площадью $S = 100$ см^2. Плоскости рамок перпендикулярны линиям индукции магнитных полей. Найти зависимость от времени ЭДС в цепи, в которую эти рамки включены последовательно. Построить векторную диаграмму складываемых ЭДС.

10. При прохождении через точку наблюдения одной продольной волны колебательная скорость частиц среды изменяется по закону $\dot{x}_1 = 3\sin(10^4 t + \pi/2)$ см/с. При прохождении через эту точку другой продольной волны колебательная скорость изменяется по закону $\dot{x}_2 = 5\sin(10^4 t - \pi/4)$ см/с. Найти закон изменения колебательной скорости $\dot{x}(t)$ в точке наблюдения, если через нее распространяются одновременно обе продольные волны в одном направлении. Построить векторную диаграмму складываемых скоростей.

11. Уравнение плоской звуковой волны имеет вид $x(t,z) = 10^{-3} \sin 200\pi(t - z/330)$ мм. Плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м^3. Найти период колебаний, длину волны, среднюю за период плотность звуковой энергии и уровень интенсивности. Определить энергию, переносимую волной через площадку $S = 1$ м^2 за время $\Delta t = 1$ мин.

12. Плоская гармоническая звуковая волна распространяется в воздухе. Плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м^3, атмосферное давление $p = 10^5$ Па. Энергия, переносимая за время $\Delta t = 1$ мин. через площадку $S = 0,6$ м^2, перпендикулярную направлению распространения волны, равна $W = 0,36$ мДж. Разность фаз колебаний между двумя точками $\Delta\varphi = \pi/5$ рад, расстояние между этими точками $\Delta z = 0,25$ м. Написать уравнение волны. Определить амплитуду акустического давления и уровень интенсивности волны.

13. Уравнение сферической волны, распространяющейся в воздухе, имеет вид $x(t,r) = \dfrac{10^{-5}}{r} \cdot \sin(10^3 t - 3r)$ м. Плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м^3. Найти мощность источника волны, а также среднюю за период плотность звуковой энергии и уровень интенсивности сигнала на расстоянии $r_1 = 100$ м от источника.

14. Частота колебаний источника гармонической сферической звуковой волны $\nu = 500$ Гц. Плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м^3, атмосферное давление $p = 10^5$ Па. Через площадку $S = 100$ см^2 за время $\Delta t = 1$ мин. волна перенесла энергию $W = 0,6$ мДж. Площадка перпендикулярна направлению распространения волны и находится на расстоянии $r_1 = 50$ м от источника. Найти уровень интенсивности сигнала в пределах площадки. Написать уравнение волны. Определить мощность источника волны.

15. Частота источника гармонической сферической звуковой волны $\nu = 1000$ Гц. Плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м^3, его температура $T = 290$ К, масса моля $M = 29$ г/моль. На расстоянии $r_1 = 100$ м от источника уровень интенсивности волны $L = 80$ дБ. Написать уравнение волны. На каком расстоянии от источника уровень интенсивности звука достигнет порога болевого ощущения $L_n = 120$ дБ?

16. Луч плоскополяризованного света последовательно проходит через 2 поляризатора. Плоскость пропускания 2-го поляризатора перпендикулярна плоскости поляризации луча, падающего на 1-й поляризатор. При каком угле α между плоскостью пропускания 1-го поляризатора и плоскостью поляризации падающего на него света интенсивность I_2 света, прошедшего оба поляризатора, будет максимальна? Найти эту интенсивность, если начальная интенсивность луча $I_0 = 0,1$ Вт/см^2.

Примечание. Один из возможных способов решения задачи состоит в построении графика функции $I_2 = f(\alpha)$ и нахождении угла, соответствующего максимуму. Второй способ состоит в нахождении экстремума этой функции, для чего надо ее производную по α приравнять нулю и из полученного равенства найти искомый угол.

17. На поляризатор падает плоскополяризованный луч света. После прохождения поляризатора интенсивность света уменьшается в 4 раза. На какой

угол надо повернуть плоскость пропускания поляризатора, чтобы он полностью гасил проходящий свет? Потери в поляризаторе не учитывать.

18. Естественный свет падает на систему из двух поляризаторов-николей, угол между плоскостями пропускания которых $\alpha = 60^\circ$. При прохождении естественного света через поляризатор-николь его интенсивность уменьшается в 2 раза. После поворота плоскости пропускания одного из поляризаторов интенсивность луча, прошедшего систему, стала равна $I_2 = 0{,}2$ Вт/см^2, увеличившись в 2 раза. Найти интенсивность луча естественного света и угол между плоскостями поляризаторов после поворота. Потерями в поляризаторах пренебречь.

19. Луч естественного света, распространяющийся в горизонтальной плоскости, падает под углом Брюстера на вертикальную поверхность диэлектрика. Отраженный от диэлектрика луч проходит через поляризатор, в результате чего его интенсивность уменьшается в 4 раза. Найти угол между горизонтальной плоскостью и плоскостью поляризации луча, вышедшего из поляризатора. Потерями в поляризаторе пренебречь.

20. Плоскости поляризации двух параллельных пучков света взаимно перпендикулярны, а интенсивности одинаковы и равны $I_1 = I_2 = 0{,}5$ Вт/см^2. На их пути ставят поляризатор. Доказать, что после прохождения поляризатора сумма интенсивностей этих пучков не зависит от ориентации плоскости пропускания поляризатора. Определить сумму интенсивностей прошедших пучков. Потерями в поляризаторе пренебречь.

21. Свет с длиной волны $\lambda = 4500$ Å от двух когерентных источников S_1 и S_2 попадает на экран Э, расположенный на расстоянии $\ell = 1{,}5$ м (рис. 4). На отрезке экрана $a = 3$ мм помещаются 3 интерференционные полосы. Наблюдатель способен различить не более 6 полос на указанном отрезке. На какую максимальную величину Δd можно увеличить расстояние между источниками, чтобы наблюдатель еще мог различать интерференционные полосы?

22. Параллельный пучок лучей с длиной волны $\lambda = 6000$ Å падает на пленку толщиной $d = 0{,}25$ мкм, имеющую показатель преломления $n = 1{,}4$. При каком угле падения α отраженный свет будет максимально ослаблен в результате интерференции? Образование интерферирующих лучей показать на рисунке.

23. Интерференция от 2-х когерентных источников (щелей) S_1 и S_2 наблюдается на экране Э, параллельном источникам (рис.4). Расстояние от экрана до источников $\ell = 2$ м, длина волны света $\lambda = 4500$ Å. 5-й интерференционный максимум находится на расстоянии $x = 3$ мм от центра экрана О. Найти расстояние d между источниками. На какое расстояние $\Delta\ell$ надо отодвинуть экран, чтобы ширина интерференционной полосы увеличилась в 1,5 раза?

24. На мыльную пленку толщиной $d = 0{,}15$ мкм падают параллельные лучи с длиной волны $\lambda = 6600$ Å под углом $\alpha = 45^\circ$. Найти показатель преломления n мыльной пленки, если отраженные лучи при интерференции максимально усилены. При расчетах учесть, что показатель преломления мыльной пленки находится в интервале $1 < n < 2$. Образование интерферирующих лучей показать на рисунке.

25. Два когерентных источника (щели) S_1 и S_2 находятся на расстоянии $d = 1$ мм друг от друга. Интерференция наблюдается на экране Э, расположенном на расстоянии $\ell = 2$ м от щелей (рис. 4). Ширина интерференционной полосы на экране $\Delta x_1 = 1{,}2$ мм.

Длину волны света уменьшили на величину $\Delta\lambda = 2000$ Å. Найти новую ширину интерференционной полосы Δx_2.

26. Источник сферической волны S и точка наблюдения А находятся на оси круглого отверстия на расстояниях a и b от него (рис. 5). Радиус отверстия r. Изменится или нет интенсивность света в точке наблюдения, если источник и точку наблюдения поменяли местами? Как изменится интенсивность в точке наблюдения в следующих случаях: 1) расстояния a от отверстия до источника и b от отверстия до точки наблюдения одновременно увеличивают в 2 раза (до увеличения в отверстии укладывалось 6 зон Френеля); 2) радиус отверстия, в котором укладываются 4 зоны Френеля, уменьшают в 2 раза; 3) длину волны уменьшают в 2 раза (до уменьшения в отверстии укладывалась 1 зона Френеля). Ответы обосновать.

27. Монохроматическая световая волна ($\lambda = 5000$ Å) излучается точечным источником S, расположенным на оси круглого отверстия (рис. 5). Расстояние от источника до отверстия $a = 1$ м, радиус отверстия $r = 1$ мм. В отверстии укладываются 3 зоны Френеля. На каком расстоянии b от отверстия находится точка наблюдения А? Минимум или максимум интенсивности наблюдается в точке А?

28. Точечный источник света S и точка наблюдения А находятся на оси круглого отверстия на расстояниях, соответственно, $a = 1$ м и $b = 2$ м от него (рис. 5). Длина волны света $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ м. При каком минимальном радиусе r отверстия в точке наблюдения будет иметь место максимум интенсивности?

29. Источник света S находится на оси круглого отверстия на расстоянии $a = 1{,}25$ м от него (рис. 5). Спектр источника содержит две длины волны $\lambda_1 = 4000$ Å (фиолетовый цвет) и $\lambda_2 = 6000$ Å (желтый цвет). Какой цвет увидит наблюдатель в точке А, находящейся на расстоянии $b = 2{,}5$ м от отверстия? Радиус отверстия $r = 1$ мм.

30. На круглое отверстие падает монохроматическая волна ($\lambda = 0{,}72$ мкм). Радиус отверстия $r = 1{,}2$ мм. Точка наблюдения А находится на оси отверстия на расстоянии $b = 2$ м от него (рис. 5). В отверстии укладываются 2 зоны Френеля. На каком расстоянии a от отверстия находится источник? Минимум или максимум интенсивности наблюдается в точке А?

31. С поверхности серого тела площадью $S = 10$ см^2 за 1 мин. излучается энергия $W = 34{,}02$ кДж. Коэффициент поглощения тела $a = 0{,}625$. Найти температуру тела и длину волны, на которую приходится максимум излучательной способности этого тела.

32. Абсолютно черное тело, имеющее температуру $t_1^\circ = 727\,^\circ$C, излучает с площади $S_1 = 20$ см^2 за промежуток времени $\Delta t_1 = 5$ мин. такую же энергию, какую излучает второе абсолютно черное тело с площади $S_2 = 10$ см^2 за промежуток времени $\Delta t_2 = 2{,}5$ мин. Определить длину волны λ_m, при которой излучательная способность второго тела максимальна?

33. Абсолютно черное тело нагрето до температуры $t^{\circ} = 1727\,^{\circ}$С. Найти длину волны, на которую приходится максимум излучательной способности этого тела. На какой из двух длин волн $\lambda_1 = 5000$ Å или $\lambda_2 = 10000$ Å излучательная способность этого тела больше (ответ обосновать)? Какую энергию излучает это тело за 1 час, если площадь его поверхности $S = 50$ см^2?

34. Абсолютно черное тело в виде шара радиусом $r_1 = 1$ см излучает за промежуток времени $\Delta t_1 = 10$ мин энергию $W_1 = 684$ кДж. Оно находится внутри сферической полости радиусом $r_2 = 10$ см, стенки которой также излучают как абсолютно черное тело. Шар и полость находятся в состоянии термодинамического равновесия. Найти: энергию W_2, излучаемую стенками полости за промежуток времени $\Delta t_2 = 1$ мин.; длину волны λ_m, на которую приходится максимум излучательной способности полости.

35. Какую энергию излучает за промежуток времени $\Delta t = 10$ мин. с поверхности $S = 100$ см^2 серое тело, коэффициент поглощения которого $a = 0{,}5$, если максимум излучательной способности этого тела приходится на длину волны $\lambda_m = 2{,}9 \cdot 10^{-6}$ м?

36. Изменение в 1,5 раза частоты ультрафиолетового излучения, падающего на вещество с работой выхода $A = 4$ эВ, привело к увеличению задерживающей разности потенциалов в 2 раза. Найти энергию и импульс фотонов, падавших на вещество до изменения частоты света.

37. Ультрафиолетовое излучение, длина волны которого $\lambda_1 = 2{,}3 \cdot 10^{-7}$ м, падает на вещество и вызывает фотоэффект. При облучении другого вещества задерживающая разность потенциалов остается такой же, что и для первого вещества, если увеличить частоту излучения на величину $\Delta\nu = 2 \cdot 10^{14}$ Гц. Длины волн, соответствующие красным границам этих веществ, отличаются в 1,25 раза. Найти максимальные энергию и скорость фотоэлектронов, выбиваемых из первого вещества.

38. Максимальная скорость электронов, вылетающих из вещества при фотоэффекте, $V_m = 8{,}4 \cdot 10^5$ м/с. При увеличении энергии падающих фотонов в 2 раза максимальная скорость фотоэлектронов изменилась в 2 раза. Найти длину волны излучения, первоначально падавшего на вещество, и работу выхода для данного вещества.

39. При падении ультрафиолетового излучения на одно вещество максимальная скорость выбиваемых фотоэлектронов $V_m = 7 \cdot 10^5$ м/с. При падении этого излучения на другое вещество энергия выбиваемых фотоэлектронов изменилась в 1,5 раза. Работа выхода электронов из второго вещества составляет 84,5% от работы выхода из первого вещества. Найти частоту и импульс падающих фотонов.

40. На вещество падает электромагнитное излучение, частота которого в 1,5 раза превышает частоту, соответствующую красной границе фотоэффекта для этого вещества. При этом задерживающая разность потенциалов $U_з = 1{,}25$ В. Найти работу выхода электронов из вещества и импульс падающих фотонов.

41. Кинетическая энергия электрона, выбитого фотоном из атома водорода, оказалась равна по модулю полной энергии этого электрона, которую он имел в атоме водорода. Найти энергию фотона, выбившего этот электрон. Длина волны де Бройля выбитого электрона $\lambda_Б = 6{,}645$ Å.

42. Электрон, находящийся на некотором энергетическом уровне в атоме водорода, может перейти в основное состояние одним из 4 различных способов через нижележащие энергетические уровни. Найти длину волны де Бройля электрона на исходном уровне и суммарную энергию фотонов, испущенных при таком переходе. Показать вышеупомянутые 4 перехода на энергетической диаграмме атома водорода.

43. Энергия электрона, перешедшего с одного энергетического уровня на другой в атоме водорода, изменилась в 4 раза, а энергия испущенного при этом переходе фотона оказалась равна $\varepsilon = 4{,}1 \cdot 10^{-19}$ Дж. Найти номера начального и конечного энергетических уровней и длину волны де Бройля электрона в конечном состоянии.

44. Найти отношение длины боровской орбиты в атоме водорода к длине волны де Бройля электрона, движущегося по этой орбите. Указать численные значения этого отношения для 1-й и 3-й орбит.

45. Чему должна быть равна максимальная длина волны де Бройля электрона, чтобы при соударении он мог ионизировать атом водорода, находящийся в основном состоянии?