

Министерство науки и высшего образования российской федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра теории и методики профессионального образования

Составитель  
А. А. Мальшин

## **ФИЗИКА**

Методические указания  
к практическим занятиям и самостоятельной работе  
для студентов 1 курса (семестр 2) специальностей СПО  
18.02.12 Технология аналитического контроля  
химических соединений

Рекомендовано цикловой методической комиссией  
математических и естественнонаучных дисциплин  
в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензенты:

Кабачевская Е. В. – доцент, зав. кафедрой теории и методики профессионального образования

Ощепкова Е. А. – председатель цикловой методической комиссии математических и естественнонаучных дисциплин СПО

**Мальшин Анатолий Александрович**

**Физика** [Электронный ресурс] : методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов 1 курса (семестр 2) специальностей СПО 18.02.12 Технология аналитического контроля химических соединений очной формы обучения / сост. А. А. Мальшин ; КузГТУ. – Электрон. издан. – Кемерово, 2019

В методических указаниях приведено содержание практических работ по дисциплине «Физика», предложены темы для самостоятельного изучения.

© КузГТУ, 2019

© Мальшин А. А.,

Составление, 2019

## Оглавление

Пояснительная записка	4
Колебания и волны	5
Практическое занятие 6. Решение задач на определение параметров гармонических колебаний механической системы	6
Практическое занятие 7. Решение задач на определение характеристик волнового процесса	12
Практическое занятие 8. Решение задач на исследование влияния конденсатора и катушки индуктивности в цепи переменного тока	18
Самостоятельная работа обучающихся. Изучение и конспектирование темы «Звуковые волны. Ультразвук и его применение»	22
Самостоятельная работа обучающихся. Изучение и конспектирование темы «Переменный ток. Активное. Емкостное и индуктивное сопротивления переменного тока»	22
Оптика	22
Практическое занятие 9. Решение задач на построение изображения в тонкой линзе	23
Практическое занятие 10. Решение задач на волновую оптику	29
Практическое занятие 11. Решение задач на элементы СТО	41
Самостоятельная работа обучающихся. Изучение и конспектирование темы «Использование интерференции в науке и технике»	43
Практическое занятие 12. Решение задач на распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела	44
Практическое занятие 13. Решение задач на волновые свойства микрочастиц	50
Практическое занятие 15. Решение задач на спектры излучения атома водорода	54
Практическое занятие 16. Решение задач на определение характеристик ионизирующих излучений	58
Самостоятельная работа обучающихся. Изучение и конспектирование темы «Спонтанное и вынужденное излучение энергии»	61

Самостоятельная работа обучающихся	Изучение и конспектирование темы «Ядерная энергетика. Термоядерный синтез».	61
Список литературы		62

## **Пояснительная записка**

При изучении курса физики большое значение имеет практическое применение теоретических знаний, главное из которых – умение самостоятельно решать задачи.

Выработка приёмов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики помогает в дальнейшем решать и сложные инженерные задачи.

### **Общие правила при решении задач**

Не приступайте к решению задач, не проработав теоретический материал на соответствующую тему.

Решая задачу, постарайтесь понять её содержание, чтобы правильно ответить на поставленные вопросы.

### **Примерная схема решения задач**

При решении задач целесообразно придерживаться следующей схемы:

1) по условию задачи представьте себе физическое явление, о котором идет речь. Сделайте краткую запись условия, выразив исходные данные в единицах СИ;

2) сделайте, где это необходимо, чертёж, схему или рисунок, поясняющий описанный в задаче процесс;

3) напишите уравнения или систему уравнений, отображающие физический процесс;

4) используя чертежи и условие задачи, преобразуйте уравнения так, чтобы в них входили лишь исходные данные и табличные величины;

5) решив задачу в общем виде, проверьте ответ по равенству размерностей величин, входящих в расчетную формулу;

6) осуществите вычисления и, получив числовой ответ, оцените его реальность.

## Колебания и волны

Окружающий нас мир полон движущихся объектов. Их движение можно разделить на два класса в зависимости от того, остается ли объект вблизи некоторого среднего положения или такого положения нет.

Возможны различные движения: колебания маятника, вибрация струны гитары, скрипки, движение электронов в атомах, скольжение фигуриста, хоккейной шайбы, пучок света или электронов в телевизионной трубке.

Иногда одно и то же движение можно отнести к любому классу в зависимости от точки зрения на объект.

Например, волна движется к берегу, но утка, сидящая на поверхности, совершает движение вверх и вниз, а также вперед назад относительно среднего положения.

Колебаниями называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости (качание маятника часов, колебания струны, изменение напряжения между обкладками конденсатора).

В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания: механические, электромагнитные, электромеханические и т. д.

В зависимости от характера воздействия на колеблющуюся систему различают *свободные* (или *собственные*) колебания, *вынужденные* колебания, *автоколебания* и *параметрические* колебания.

Источниками волн являются колебательные процессы. Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), передаются частицам среды.

Процесс распространения колебаний в среде называется упругой волной. Электромагнитные волны могут распространяться и в вакууме. Составной частью всех колебаний является простое *гармоническое* колебание. Любое повторяющееся движение можно рассматривать как результат наложения простых гармонических колебаний, а любой волновой процесс — как сумму простых гармонических волн.

## Практическое занятие 6

### Решение задач на определение параметров гармонических колебаний механической системы

Для механических колебаний материальной точки (тела) характерно существование положения устойчивого равновесия, в котором материальная точка (тело) находится до тех пор, пока внешняя сила не выведет ее из этого состояния. За счет работы внешних сил материальная точка получает избыточную энергию и, предоставленная самой себе, совершает *собственные* или *свободные* колебания при последующем отсутствии внешних воздействий.

*Максимальное значение колеблющейся величины называется амплитудой  $A$  колебания.*

Колебания осциллятора, происходящие с постоянной амплитудой, называются *незатухающими*, а с уменьшающейся амплитудой – *затухающими*.

Время одного полного колебания называется *периодом  $T$* .

Число полных колебаний за единицу времени называется *частотой  $\nu$*  периодических колебаний. Очевидна связь между периодом и частотой:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Размерность частоты  $[\nu] = 1 \text{ Гц (герц)}$ .

Число полных колебаний за время  $2\pi$  секунд называется *циклической* или *круговой частотой  $\omega$* :

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (2)$$

Размерность циклической частоты  $[\omega] = 1 \text{ рад/с} = \text{с}^{-1}$ .

*Гармоническими называются колебания, при которых колеблющаяся величина  $S$  изменяется со временем по закону синуса (или косинуса)*

$$S = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда;  $\omega_0$  – циклическая частота; аргумент синуса  $(\omega_0 t + \varphi_0)$  – фаза колебания, определяющая значение  $S$  в данный момент времени  $t$ ;  $\varphi_0$  – начальная фаза колебания, которая определяет значение  $S$  в момент начала отсчета времени ( $t = 0$ ). Так

как синус изменяется в пределах от  $+1$  до  $-1$ , то  $S$  может принимать значения от  $+A$  до  $-A$ . На рис. 1 представлен график  $S(t)$  гармонического колебания.

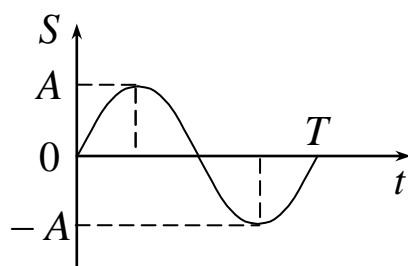


Рис. 1

Гармонические колебания – простейшие периодические колебания. Большинство колебаний, встречающихся на практике, являются сложными. Однако любое сложное периодическое колебание, согласно теореме Фурье, представляет собой сумму простейших гармонических колебаний – *гармоник*.

При решении задач данной темы необходимо знать:

- 1) *типы колебательных процессов;*
- 2) *типы гармонических осцилляторов;*
- 3) *характеристики гармонических колебаний.*

В зависимости от типа гармонического осциллятора циклическая частота колебаний  $\omega$  записывается в виде:

а) для математического маятника  $\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$ , где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\ell$  – длина маятника;

б) для физического маятника  $\omega = \sqrt{\frac{mgd}{J_Z}}$ , где  $m$ ,  $J_Z$ ,  $d$  – масса, момент инерции маятника относительно оси колебаний  $Z$  и расстояние от центра масс маятника до точки подвеса соответственно;

в) для пружинного маятника  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , где  $k$  – жесткость пружины;  $m$  – масса маятника;

*Скорость и ускорение* материальной точки, совершающей гармонические колебания, определяются уравнениями:



$$v = \frac{dx}{dt} = \omega x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ либо } v = \frac{dx}{dt} = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0);$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 x_m \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ либо}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Полная механическая энергия колеблющейся материальной точки массой  $m$

$$W = W_{\text{п}} + W_{\text{к}} = \frac{k x^2}{2} + \frac{m v^2}{2} = \frac{m x_m^2 \omega^2}{2} = \frac{k x_m^2}{2}, \quad (4)$$

где  $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$  – потенциальная энергия;  $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$  – ее кинетическая энергия;  $k = m\omega^2$  – коэффициент упругости.

Полная энергия колеблющейся системы определяется амплитудой колебаний изменяющейся величины.

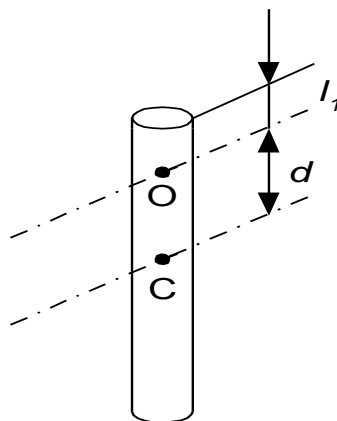


Рис. 2. Физический маятник

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Физический маятник в виде тонкого однородного стержня (рис. 1.23) длиной 120 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей перпендикулярно стержню через точку, удаленную на расстоянии 30 см от его конца. Определить период колебаний этого стержня.

Дано:  
 $l = 1,2 \text{ м}$   
 $l_1 = 0,3 \text{ м}$

Решение:  
 Период  $T$  колебаний физического маятника опре-

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_O}{mgd}},$$

деляется выражением

$T - ?$

где  $I_O$  – момент инерции стержня относительно оси колебаний, которая проходит через точку  $O$ ;  $m$  – масса стержня;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$  – расстояние от центра масс (точка  $C$ ) до оси колебаний.

Согласно теореме Штейнера

$$I_O = I_C + md^2,$$

где  $I_C = \frac{1}{12}ml^2$  – момент инерции стержня относительно оси, проходящей через центр масс этого стержня;  $d$  – расстояние между осями. Расстояние  $d$  между осями в данной задаче

$$d = \frac{l}{2} - l_1 = \frac{1,2}{2} - 0,3 = 0,3 \text{ м}.$$

Тогда период колебаний данного физического маятника равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m \left[ \frac{l^2}{12} + d^2 \right]}{mgd}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{0,12 + 0,09}{9,81 \cdot 0,3}} = 1,7 \text{ с}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

1.1–1.10. Материальная точка массой  $m$  совершает гармонические колебания по закону синуса с периодом  $T$ , начальной фазой  $\varphi_0$ , амплитудой колебаний  $A$ . Определить в момент времени, когда смещение  $\Delta x$ : 1) скорость  $v$  и ускорение  $a$  точки; 2) силу  $F$ , кинетическую  $E_{\text{кин}}$  и полную энергию  $W$ .

№	$m$	$v$	$A$	$\varphi_0$	$\Delta x$
	г	Гц	см	рад	см
1.1	200	1	5	$\pi/6$	2
1.2	300	0,75	3	$\pi/5$	1
1.3	80	0,5	2	$\pi/8$	1



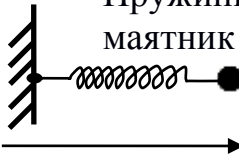
№	$m$	$\nu$	$A$	$\varphi_0$	$\Delta x$
	г	Гц	см	рад	см
1.4	100	0,25	4	$\pi/6$	0,5
1.5	150	0,2	6	$3\pi/4$	1
1.6	125	1	8	$\pi/3$	1
1.7	200	0,05	7	$3\pi/4$	2
1.8	300	0,025	10	$\pi/6$	2
1.9	80	0,25	15	$\pi/6$	5
1.10	100	0,025	3	$\pi/6$	1

1.11–1.20. Складываются два колебания одинакового направления и одинакового периода:  $x_1 = A_1 \sin \omega t$  и  $x_2 = A_2 \sin \omega(t + \tau)$ . Определить амплитуду  $A$  и начальную фазу  $\varphi_0$  результирующего колебания. Написать его уравнение. Построить с соблюдением масштаба векторную диаграмму для момента времени  $t_1$ .

№	$A_1$	$A_2$	$T$	$\tau$	$t_1$
	см	см	мс	мс	мс
1.11	10	7	7	2	2
1.12	10	8	10	2	1
1.13	10	6	15	4	1
1.14	10	5	4	1	3
1.15	10	4	6	2,5	1
1.16	10	9	8	2	1
1.17	10	11	7	4	3
1.18	10	8	8	4	2
1.19	10	7	15	4	5
1.20	10	6	3	5	2

1.21–1.26. Система совершает гармонические колебания с амплитудой  $A$ . Определить период  $T$  и циклическую частоту  $\omega$  колебаний, записать уравнение гармонических колебаний, если начальная фаза  $\varphi_0$ , определить полную энергию  $W$  системы.

Таблица 6

№ задачи	Тип системы	Амплитуда	Характеристики системы	$\Phi_0$ , рад
1.21	 Математический маятник	$x_m = 2$ см	$\ell = 0,8$ м, $m = 10$ г	$\frac{\pi}{4}$
1.22		$x_m = 1,5$ см	$\ell = 0,8$ м, $m = 30$ г	$\frac{\pi}{3}$
1.23	 Физический маятник	$\alpha_m = 5^\circ$	$\ell = 0,2$ м, $m = 0,3$ кг	$\frac{\pi}{3}$
1.24		$\alpha_m = 4^\circ$	$\ell = 0,8$ м, $m_{\text{сг}} = 100$ г	$\frac{\pi}{2}$
1.25	 Пружинный маятник	$x_m = 1$ см	$k = 120$ Н/м, $m = 50$ г	0
1.26		$x_m = 0,5$ см	$k = 110$ Н/м, $m = 40$ г	$\frac{3\pi}{4}$

1.27. Груз массой 400 г совершает колебания на пружине с жесткостью 250 Н/м. Определить максимальную скорость груза, если амплитуда колебаний равна 15 см.

1.28. Из двух математических маятников один совершил 10 колебаний, другой за то же время 6 колебаний. Найти длину каждого маятника, если разница в их длине составляет 20 см.

1.29. Определить частоту простых гармонических колебаний диска радиусом  $R = 20$  см около горизонтальной оси, проходящей через середину радиуса диска перпендикулярно его плоскости.

1.30. Определить период  $T$  простых гармонических колебаний диска радиусом  $R = 40$  см около горизонтальной оси, проходящей через образующую диска.

1.31. Ракета поднимается вверх с ускорением  $30 \text{ м/с}^2$ . Сколько полных колебаний совершит помещенный в ракету маятник длиной 1 м за время, в течение которого ракета поднимется на высоту 1500 м. Ускорение свободного падения считать постоянным.

1.32. Определить период  $T$  колебаний математического маятника, если его модуль максимального перемещения  $\Delta r = 18$  см и максимальная скорость  $V_{\max} = 16$  см/с.

1.33. На Земле маятник колеблется с периодом в 1 с. Каков будет период колебания этого маятника на Марсе, где ускорение свободного падения примерно в 2,6 раза меньше, чем на Земле?

1.34. На стержне длиной  $l = 30$  см укреплены два одинаковых грузика: один – в середине стержня, другой – на одном из его концов. Стержень с грузами колеблется около горизонтальной оси, проходящей через свободный конец стержня. Определить приведенную длину  $L$  и период  $T$  простых гармонических колебаний данного физического маятника. Массой стержня пренебречь.

### Практическое занятие 7

#### Решение задач на определение характеристик волнового процесса

Волны подразделяются на *упругие (механические)*, *волны на поверхности жидкости* и *электромагнитные*.

Упругие (механические) волны возникают при распространении *механических возмущений в упругой среде*. Если направление колебаний частиц в упругой среде происходит в направлении распространения волны, то такая волна называется *продольной*. При поперечном направлении колебаний по отношению к направлению распространения волны последняя называется *поперечной*. Продольные волны возникают в твердых, жидких и газообразных средах *при деформациях сжатия и растяжения*. Поперечные волны возникают при *деформациях сдвига*, т. е. только в твердых телах.

Упругая волна называется *гармонической*, если соответствующие ей колебания частиц являются *гармоническими*

$$S = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

Уравнение (5) выражает зависимость смещения  $S$  колеблющейся точки от времени в данном месте среды (точка  $O$ , рис. 3). Пусть эти смещения происходят вдоль оси  $OY$ . В волне происходят смещения от положения равновесия все новых частиц (например, частицы  $B$ ) с координатой  $x$ . Рис. 3 представляет со-

бой график функции  $S(x, t)$ , т. е. график зависимости смещения  $S$  всех частиц среды от расстояния  $x$  до источника колебаний в каждый момент времени.

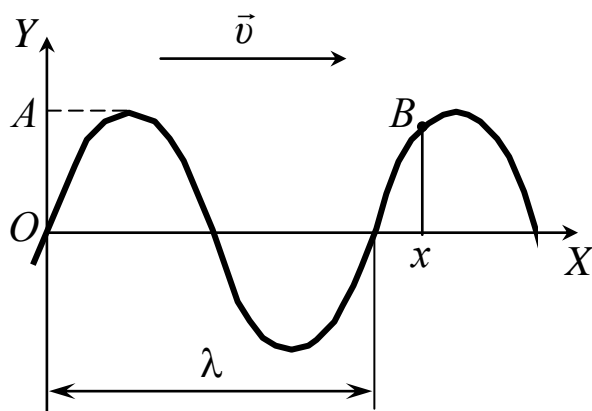


Рис. 3

Колебания частиц среды распространяются с конечной скоростью  $v$ , зависящей от свойств среды. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начинает колебаться. Следовательно, фазы колебаний источника и частиц среды отличаются и тем больше, чем дальше частицы удалены от источника и друг от друга.

*Расстояние между частицами, колеблющимися с разностью фаз  $2\pi$  радиан, называется длиной волны  $\lambda$ .*

*Периодом  $T$  называется время одного полного колебания частицы. За время  $T$  колебания в волне (и фаза любой точки) распространяются на расстояние, равное длине волны, т. е.*

$$\lambda = v T. \quad (6)$$

*Число колебаний в единицу времени называется частотой  $\nu$ . Очевидны соотношения*

$$T = \frac{1}{\nu}; \quad v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu. \quad (7)$$

В волновом процессе колеблются не только частицы, расположенные вдоль оси  $OX$ , но и совокупность частиц, расположенных в некотором объеме. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени  $t$ , называется *фронтом волны*. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется *волновой поверхностью*.

По форме волновых поверхностей волны подразделяются на *плоские, сферические* и более сложной формы.

*Бегущими* называются *волны*, которые переносят в пространстве энергию.

Рассмотрим гармоническую плоскую бегущую волну, распространяющуюся вдоль оси  $OX$  со скоростью  $v$  (см. рис. 3).

Волновые поверхности в такой волне представляют собой плоскости, перпендикулярные оси  $OX$ . Так как все точки волновой поверхности колеблются одинаково, то уравнение плоской волны представляет собой зависимость смещения колеблющихся точек от координаты  $x$  и времени  $t$ :  $S = S(x, t)$ . Колебания некоторой частицы  $B$  среды, находящейся на расстоянии  $x$  от источника колебаний, отстают от колебаний источника на время  $\tau = x/v$ . Уравнение (5) для точки  $B$  принимает вид  $S(x, t) = A \sin[\omega(t - \tau) + \varphi_0]$  или

$$S(x, t) = A \sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{v} + \varphi_0\right), \quad (8)$$

где  $A$  – амплитуда волны;  $\omega$  – циклическая частота ( $\omega = 2\pi\nu$ );  $\varphi_0$  – начальная фаза волны;  $(\omega t - \frac{\omega x}{v} + \varphi_0)$  – фаза волны.

Уравнение (8) можно записать в виде

$$S(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (9)$$

где  $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число (число длин волн, укладываемых на отрезке  $2\pi$ ).

Выражение (8) или (9) представляет собой *уравнение плоской гармонической волны*, распространяющейся вдоль положительного направления оси  $OX$ .

### **Примеры решения задач**

**Пример 2.** Плоская синусоидальная волна распространяется вдоль прямой, совпадающей с положительным направлением оси  $X$  в среде, не поглощающей энергию, со скоростью  $V = 15$  м/с. Две точки, находящиеся на расстояниях  $x_1 = 5$  м и  $x_2 = 5,5$  м от источника колебаний, колеблются с разностью фаз  $\Delta\varphi = \pi/5$  и амплитудой  $y_m = 4$  см. Определить длину волны  $\lambda$ ,

циклическую частоту  $\omega$ , записать уравнение волны ( $\varphi_0 = 0$ ), определить смещение  $y_2$  точек в момент времени  $t_1 = 3$  с.

Дано:

$$V = 15 \text{ м/с}$$

$$x_1 = 5 \text{ м}$$

$$x_2 = 5,5 \text{ м}$$

$$\Delta\varphi = \pi/5$$

$$y_m = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$t = 3 \text{ с}$$

$$\varphi_0 = 0$$

$$\lambda; \omega; y(x, t);$$

$$y_1; y_2 - ?$$

Решение:

Разность фаз  $\Delta\varphi$  колебаний двух точек волны, расстояние  $\Delta x = x_2 - x_1$  между ними и длина волны  $\lambda$  связаны соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}, \text{ из которого следует:}$$

$$\lambda = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{\Delta\varphi}. \text{ Рассчитаем длину волны}$$

$$\lambda = \frac{2\pi(5,5 - 5) \cdot 5}{\pi} = 5 \text{ м} \text{ и волновое число}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{5} \text{ м}^{-1}.$$

Циклическая частота  $\omega$  колебаний частиц в волне определяется из соотношения  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  с учетом выражения  $\omega = \frac{2\pi V}{\lambda} = kV$ .

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15}{5} = 6\pi = 18,84 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для определения смещения  $y_1$  и  $y_2$  точек с координатами  $x_1$  и  $x_2$  в указанный момент времени необходимо записать уравнение плоской упругой волны, распространяющейся вдоль оси  $X$  для заданного условия задачи:

$$y(x, t) = 0,04 \sin \left( 6\pi t - \frac{2\pi}{5} x \right) = 0,04 \sin 2\pi \left( 3t - \frac{x}{5} \right).$$

Результаты расчета смещения указанных точек:

$$y_1 = 0,04 \sin 2\pi(3 \cdot 3 - 1) = 0 \text{ и } y_2 = 0,04 \sin 2\pi(3 \cdot 3 - 1,1) \approx -0,01 \text{ м}.$$

**Пример 3.** Плоская монохроматическая волна распространяется в однородной и изотропной среде с  $\varepsilon = 2$  и  $\mu = 1$ . Амплитуда напряженности электрического поля волны  $E_m = 12 \text{ В/м}$ . Определить для этой волны фазовую скорость  $V$ , амплитуду  $H_m$  напряженности магнитного поля и максимальное значение плотности потока энергии  $P_m$ .



Дано:

$$\varepsilon = 2$$

$$\mu = 1$$

$$E_m = 12 \text{ В/м}$$

$$V; H_m; P_m - ?$$

Решение:

Используя соотношение для фазовой скорости электромагнитной волны

$$V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}},$$

и заданные значения  $\varepsilon$  и  $\mu$  получим величину фазовой скорости

$$V = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{2}} = 2,13 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей в бегущей волне связаны соотношением (2.23):

$$\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E_m = \sqrt{\mu \mu_0} H_m.$$

Откуда амплитуда напряженности магнитного поля волны

$$H_m = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} E_m = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} 12 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}.$$

Модуль вектора плотности потока энергии электромагнитного поля определяется мгновенными значениями напряженностей электрического и магнитного полей в бегущей волне. Так как величины  $E$  и  $H$  в каждой точке волны изменяются со временем по гармоническому закону, находясь в одинаковой фазе, то мгновенное значение плотности потока энергии электромагнитной волны равно

$$P = E_m \sin \omega t \cdot H_m \sin \omega t = E_m H_m \sin^2 \omega t.$$

Максимальное значение  $P_m$  плотности потока энергии при  $\sin^2 \omega t = 1$

$$P_m = E_m H_m = 12 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 0,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

2.1-2.10. Задано уравнение волны  $\xi(x, t) = A \cos(\omega t - k x)$ . Определить частоту  $\nu$  и период  $T$  колебаний, фазовую скорость  $V_{\text{ф}}$ , максимальные значения скорости  $\dot{\xi}_{\text{max}}$  и ускорения  $\ddot{\xi}_{\text{max}}$  колебаний частиц среды. Найти смещение частиц среды в точке  $x_1$  в момент времени  $t_1$ .

	$A$	$\omega$	$k$	$x_1$	$t_1$
	см	$\text{C}^{-1}$	$\text{м}^{-1}$	м	с
2.1	1	628	2	2	3
2.2	0,75	314	1	1	1
2.3	0,5	157	3	3	3
2.4	0,25	628	4	4	1
2.5	1	314	5	5	2
2.6	0,75	157	2	2	4
2.7	0,5	628	1	1	3
2.8	0,25	314	3	3	1
2.9	0,5	157	4	4	2
2.10	0,75	628	5	5	4

2.11-2.20. Стоячая волна образуется при наложении бегущей волны и волны, отраженной от границы раздела сред, перпендикулярной направлению распространения волны. Найти положения (расстояния от границы раздела сред) узлов и пучностей стоячей волны, если отражение происходит от среды более или менее плотной. Скорость распространения звуковых волны  $V_{\text{зв}}$  и частота  $\nu$ .

№	Среда	$V_{\text{зв}}$	$\nu$
		м/с	кГц
2.11	более плотная	340	3,0
2.12	менее плотная	340	3,1
2.13	более плотная	340	3,2
2.14	менее плотная	340	4,3
2.15	более плотная	340	5,0
2.16	менее плотная	1000	2,5
2.17	более плотная	1000	1,2
2.18	менее плотная	1000	3,3
2.19	более плотная	1000	4,4
2.20	менее плотная	1000	5,2

2.21. Маяк посылает пароходу одновременно два сигнала: первый – звуковыми волнами в воздухе, второй – в воде при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На пароходе первый сигнал был услышан через время  $\Delta t = 4\text{ с}$  после первого. Найти расстояние парохода от маяка.

2.22. Для определения температуры верхних слоев атмосферы нельзя пользоваться термометром, так как вследствие малой плотности газа термометр не придет в тепловое равновесие с окружающей средой. Для этой цели пускают ракету с гранатами, взрывающимися при достижении определенной высоты. Найти температуру  $t$  на высоте  $h = 20\text{ км}$  от поверхности Земли, если известно, что звук взрыва, произведенного на высоте  $h_1 = 21\text{ км}$ , пришел позже на  $\Delta t = 6,75\text{ с}$  звука от взрыва, произведенного на высоте  $h_2 = 19\text{ км}$ .

2.23. Найти расстояние  $l$  между соседними зубцами звуковой бороздки на граммофонной пластике для тона ля ( $\nu = 435\text{ Гц}$ ): а) в начале записи на расстоянии  $l_1 = 12\text{ см}$  от центра; б) в конце записи на расстоянии  $l_2 = 4\text{ см}$  от центра. Частота вращения пластинки  $n = 78\text{ мин}^{-1}$ .

2.24. Колебательный контур радиоприемника настроен на частоту  $9\text{ МГц}$ . Во сколько раз следует увеличить емкость конденсатора колебательного контура, чтобы приемник был настроен на длину волны  $50\text{ м}$ ?

2.25. Электромагнитные волны распространяются в некоторой среде со скоростью  $2 \cdot 10^8\text{ м/с}$ . Определить длину волны в этой среде, если частота колебаний равна  $1\text{ МГц}$ .

## **Практическое занятие 8**

### **Решение задач на исследование влияния конденсатора и катушки индуктивности в цепи переменного тока**

Рассмотрим процессы, происходящие на участке цепи, содержащем резистор сопротивлением  $R$ , катушку с индуктивностью  $L$  и конденсатор емкостью  $C$  (рис. 4).

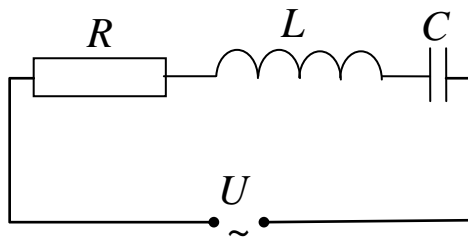


Рис. 4. Электрическая цепь

Напряжение  $U$  равно

$$U = U_0 \sin \omega t. \quad (1.21)$$

Каждый участок цепи обладает сопротивлением:  $R$  – сопротивление резистора (активное),  $X_L$  – реактивное индуктивное сопротивление,  $X_C$  – реактивное емкостное сопротивление. По закону Ома амплитудное значение силы переменного тока равно

$$I_0 = \frac{U_0}{Z}, \quad (10)$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока.

Полное сопротивление можно рассчитать по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}, \quad (11)$$

где  $\omega L = X_L$ ;  $1/(\omega C) = X_C$ . Если конденсатор в цепи отсутствует, то

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (12)$$

При выполнении условия  $\omega L = 1/(\omega C)$  ток в цепи достигает максимального значения при заданных  $U_0$  и  $R$  (резонансный ток). Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете изоляции электрических линий, содержащих конденсаторы и катушки индуктивности.

Колебательные контуры применяются в качестве источников электромагнитных колебаний и волн, а также в приемниках электромагнитных волн. В последнем случае колебательный контур настраивается на частоту излучающей радиостанции путем изменения емкости конденсатора или индуктивности катушки.

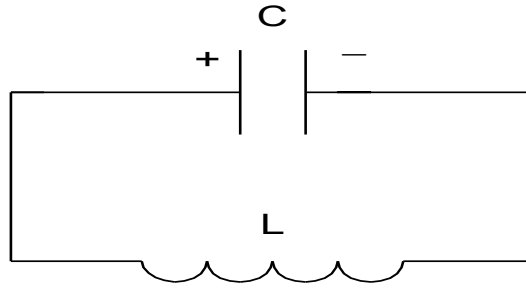


Рис. 5. Колебательный контур

**Пример 4.** В электрической цепи, содержащей конденсатор электроемкостью  $C = 0,2$  мкФ и катушку индуктивностью  $L = 1$  мГн, сила тока изменяется по закону  $I = 0,02\sin\omega t$ , А. Определить энергию колебательного контура. Омическим сопротивлением катушки и соединительных проводов пренебречь.

Решение: Идеальный *колебательный контур* – это электрическая цепь, состоящая из конденсатора емкостью  $C$  и катушки индуктивностью  $L$  (рис. 5). Рассчитаем энергию колебательного контура:

$$W = W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{Q_m^2}{2C}.$$

$$W = \frac{10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2}{2} = \frac{10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$$

$$\text{Напряжение на обкладках конденсатора } u = \frac{Q}{C}.$$

где  $Q$  – заряд на обкладках конденсатора, изменяющийся со временем.

Циклическая частота  $\omega$  электрических колебаний в контуре

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Следовательно, напряжение на конденсаторе изменяется со временем по закону

$$u = -\frac{0,02}{C}\sqrt{LC} \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right).$$

Подставляя численные значения  $L$  и  $C$ , получим

$$u = -1,41 \cos(7,07 \cdot 10^4 t).$$

### **Задачи для самостоятельного решения**

3.1 Конденсатор, емкость которого можно изменять, включен в цепь последовательно с лампочкой от карманного фонаря и источником переменного тока, частоту которого можно изменять. Как изменится накал лампочки, если: а) не меняя емкости конденсатора, увеличить частоту переменного тока; б) не меняя частоту, увеличить емкость конденсатора?

3.2 Каково сопротивление конденсатора емкостью 4 мкФ в цепях с частотой переменного тока 50 и 400 Гц?

3.3 Конденсатор включен в цепь переменного тока стандартной частоты. Напряжение в сети 220 В. Сила тока в цепи этого конденсатора 2,5 А. Какова емкость конденсатора?

3.4 Катушка от школьного универсального трансформатора включена в цепь последовательно с лампочкой от карманного фонаря и источником переменного тока регулируемой частоты. Как изменится накал лампочки, если: а) не меняя частоту, поместить в катушку железный сердечник; б) уменьшить частоту?

3.5 Каково индуктивное сопротивление катушки с индуктивностью 0,2 Гн при частоте тока 50 Гц? 400 Гц?

3.6 Катушка с ничтожно малым активным сопротивлением включена в цепь переменного тока с частотой 50 Гц. При напряжении 125 В сила тока равна 2,5 А. Какова индуктивность катушки?

3.7 В цепь переменного тока включены последовательно конденсатор, катушка без сердечника и лампа накаливания. При постепенном введении сердечника лампа сначала стала гореть ярче, а затем накал нити начал уменьшаться. Почему?

3.8 В цепь переменного тока с частотой 400 Гц включена катушка индуктивностью 0,1 Гн. Конденсатор какой емкости надо включить в эту цепь, чтобы осуществился резонанс?

3.9 В цепь включены конденсатор емкостью 2 мкФ и катушка индуктивностью 0,05 Гн. При какой частоте тока в этой цепи будет резонанс?

### **Самостоятельная работа обучающихся**

#### **«Звуковые волны. Ультразвук и его применение»**

Студенты должны изучить содержание параграфов в учебниках [1] §§52, 53, [2] 15.6, 15.7. Законспектировать основное содержание параграфов и ответить на следующие вопросы:

1. Что такое звуковые волны?
2. Какие характеристики у звуковых волн?
3. Где распространяются продольные звуковые волны?
4. Где распространяются поперечные звуковые волны?
5. Что такое ультразвук?
6. Какие характеристики у ультразвука?
7. Где и как применяется ультразвук?

### **Самостоятельная работа обучающихся**

#### **«Переменный ток. Активное. Емкостное и индуктивное сопротивление переменного тока»**

Студенты должны изучить содержание параграфов в учебниках [1] §§158, 159, [2] 16.7, 16.8. Законспектировать основное содержание параграфов и ответить на следующие вопросы:

1. Что такое переменный ток?
2. Какие характеристики переменного тока?
3. Что такое активное сопротивление?
4. Что такое емкостное сопротивление?
5. Что такое индуктивное сопротивление?
6. Что такое полное сопротивление?

### **Оптика**

*Оптика* – раздел физики, в котором рассматриваются закономерности излучения, поглощения и распространения света. Принято разделять оптику на *геометрическую* и *физическую*.

Геометрическая оптика не рассматривает вопросы о природе света. Ее основными законами являются *закон прямолинейного распространения света*, *закон отражения* (падающий, отраженный лучи и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения луча лежат в одной плоскости; угол отражения равен углу падения) и *закон преломления* (луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к

синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред, равная отношению показателю преломления второй среды относительно первой  $\sin i_1 / \sin i_2 = n_{21}$ ). На основе законов геометрической оптики рассчитываются оптические приборы от очковых линз до сложных астрономических телескопов.

Физическая оптика изучает проблемы, связанные с природой света и световых явлений. Природа света двойственная. С одной стороны, свет представляет собой электромагнитную волну, с другой – поток частиц – фотонов. Явления интерференции, дифракции и поляризации света математически описываются с помощью волновых представлений о природе света.

### Практическое занятие 9

#### Решение задач на построение изображения в тонкой линзе

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Если толщина самой линзы мала по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей, то линзу называют тонкой.

Линзы входят в состав практически всех оптических приборов. Линзы бывают собирающими и рассеивающими. Собирающая линза в середине толще, чем у краев, рассеивающая линза, наоборот, в средней части тоньше (рис. 6).

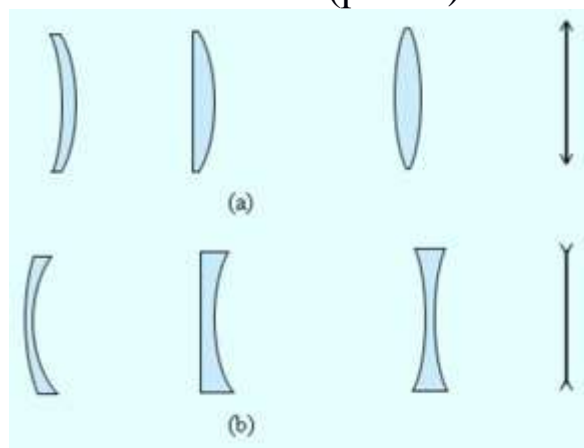


Рис. 6. Собирающие (a) и рассеивающие (b) линзы  
и их условные обозначения

Если на линзу направить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после прохождения через линзу лучи (или их продолжения) соберутся в одной точке  $F$ , которая называется **главным фокусом** линзы. У тонкой линзы имеются два глав-



ных фокуса, расположенных симметрично на главной оптической оси относительно линзы. У собирающих линз фокусы действительные, у рассеивающих – мнимые. Пучки лучей, параллельных одной из побочных оптических осей, после прохождения через линзу также фокусируются в точку  $F'$ , которая расположена при пересечении побочной оси с **фокальной плоскостью**  $\Phi$ , то есть плоскостью, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус (рис. 7). Расстояние между оптическим центром линзы  $O$  и главным фокусом  $F$  называется фокусным расстоянием. Оно обозначается той же буквой  $F$ .

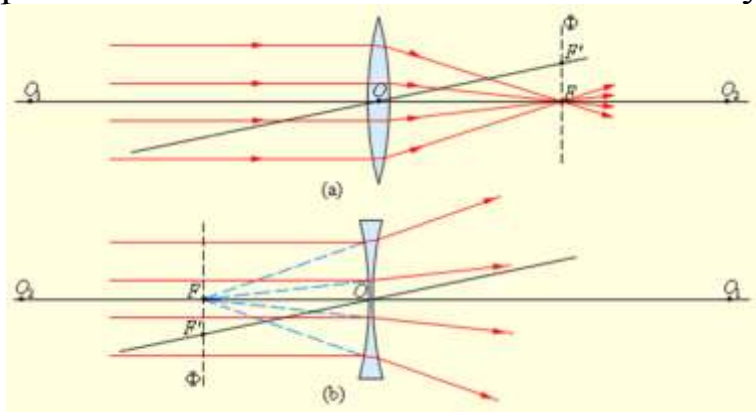


Рис. 7. Ход лучей в линзах:  $a$  – собирающая;  $b$  – рассеивающая

Положение изображения и его характер можно определить с помощью геометрических построений. Для этого используют свойства некоторых стандартных лучей, ход которых известен. Это лучи, проходящие через оптический центр или один из фокусов линзы, а также лучи, параллельные главной или одной из побочных оптических осей. Примеры таких построений представлены на рис. 8, 9.

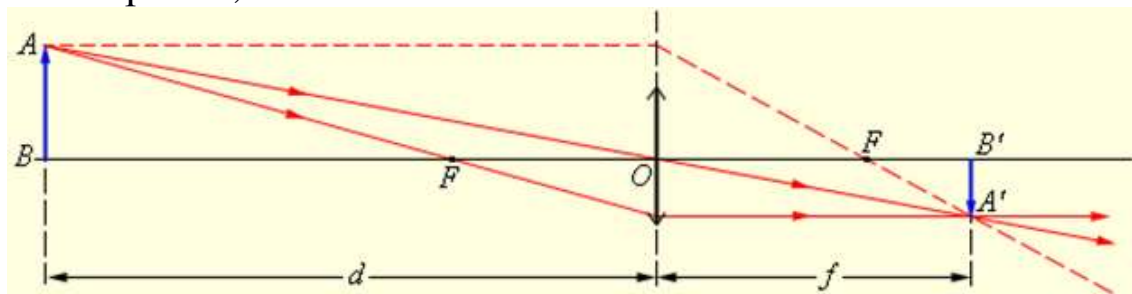


Рис. 8. Построение изображения в собирающей линзе

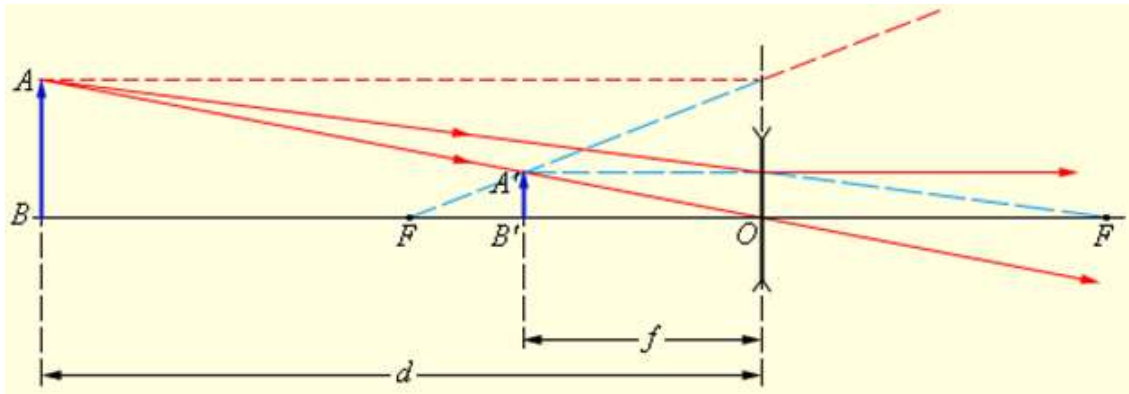


Рис. 9. Построение изображения в рассеивающей линзе

Положение изображения и его характер (действительное или мнимое) можно рассчитать с помощью **формулы тонкой линзы**. Если расстояние от предмета до линзы обозначить через  $d$ , а расстояние от линзы до изображения через  $f$ , то формулу тонкой линзы можно записать в виде:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

Величину  $D$ , обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой** линзы. Единицей измерения оптической силы является **диоптрия** (дптр). Диоптрия – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м:

Фокусным расстояниям линз принято приписывать определенные знаки: для собирающей линзы  $F > 0$ , для рассеивающей  $F < 0$ .

Величины  $d$  и  $f$  также подчиняются определенному правилу знаков:

$d > 0$  и  $f > 0$  – для действительных предметов (то есть реальных источников света, а не продолжений лучей, сходящихся за линзой) и изображений;

$d < 0$  и  $f < 0$  – для мнимых источников и изображений.

В зависимости от положения предмета по отношению к линзе изменяются линейные размеры изображения. **Линейным увеличением** линзы  $\Gamma$  называют отношение линейных размеров изображения  $h'$  и предмета  $h$ . Величине  $h'$ , как и в случае сферического зеркала, удобно приписывать знаки плюс или минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Величина  $h$  всегда считается положительной. Поэтому для прямых изображений  $\Gamma > 0$ , для перевернутых  $\Gamma < 0$ . Из подобия

треугольников на рис. 8 и 94 легко получить формулу для линейного увеличения тонкой линзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = -\frac{f}{d}$$

Оптическая сила  $D$  линзы зависит как от радиусов кривизны  $R_1$  и  $R_2$  ее сферических поверхностей, так и от показателя преломления  $n$  материала, из которого изготовлена линза. В курсах оптики доказывается следующая формула:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Радиус кривизны выпуклой поверхности считается положительным, вогнутой – отрицательным. Эта формула используется при изготовлении линз с заданной оптической силой.

Во многих оптических приборах свет последовательно проходит через две или несколько линз. Изображение предмета, даваемое первой линзой, служит предметом (действительным или мнимым) для второй линзы, которая строит второе изображение предмета. Это второе изображение также может быть действительным или мнимым. Частным случаем является телескопический ход лучей в системе из двух линз, когда и предмет, и второе изображение находятся на бесконечно больших расстояниях. Телескопический ход лучей реализуется в зрительных трубах – *астрономической трубе Кеплера* и *земной трубе Галилея*.

Формирование собирающей линзой действительного изображения предмета используется во многих оптических приборах, таких как фотоаппарат, проектор и т. д.

**Фотоаппарат** представляет собой замкнутую светонепроницаемую камеру. Изображение фотографируемых предметов создается на фотопленке системой линз, которая называется *объективом*. Специальный затвор позволяет открывать объектив на время экспозиции.

Особенностью работы фотоаппарата является то, что на плоской фотопленке должны получаться достаточно резкими изображения предметов, находящихся на разных расстояниях.

### Задачи для самостоятельного решения

4.1 Линза, расположенная на оптической скамье между лампочкой и экраном, дает на экране резко увеличенное изобра-

жение лампочки. Когда лампочку передвинули на 40 см ближе к экрану, на нем появилось резко уменьшенное изображение лампочки. Определить фокусное расстояние линзы, если расстояние от лампочки до экрана равно 80 см.

4.2 Каково наименьшее возможное расстояние между предметом и его действительным изображением, создаваемым собирающей линзой с главным фокусным расстоянием 12 см?

4.3 Человек движется вдоль главной оптической оси объектива фотоаппарата со скоростью  $V = 5$  м/с. С какой скоростью  $u$  необходимо перемещать матовое стекло фотоаппарата, чтобы изображение человека на нем все время оставалось резким? Главное фокусное расстояние объектива равно 20 см. Вычисления выполнить для случая, когда человек находился на расстоянии  $a = 10$  м от фотоаппарата.

4.4 Из стекла требуется изготовить плосковыпуклую линзу, оптическая сила которой равна 5 дптр. Определить радиус  $R$  кривизны выпуклой поверхности линзы.

4.5 Двояковыпуклая линза имеет одинаковые радиусы кривизны поверхностей. При каком радиусе кривизны  $R$  поверхностей линзы главное фокусное расстояние ее будет равно 20 см?

4.6 Отношение радиусов кривизны поверхностей линзы равно 2. При каком радиусе кривизны  $R$  выпуклой поверхности оптическая сила линзы равна 10 дптр?

4.7 Определить радиус  $R$  кривизны выпуклой поверхности линзы, если при отношении радиусов кривизны поверхностей линзы, равном 3, ее оптическая  $D = -8$  дптр.

4.8 Из двух часовых стекол с одинаковыми радиусами  $R$  кривизны, равными 0,5 м, склеена двояковогнутая «воздушная» линза. Какой оптической силой  $D$  будет обладать такая линза в воде?

4.9 Линза изготовлена из стекла, показатель преломления которого для красных лучей  $n_k = 1,50$ , для фиолетовых  $n_f = 1,52$ . Радиусы кривизны  $R$  обеих поверхностей линзы одинаковы и равны 1 м. Определить расстояние между фокусами линзы для красных и фиолетовых лучей.

4.10 Определить главное фокусное расстояние плосковыпуклой линзы, диаметр, которой равен 10 см. Толщина  $H$  в центре линзы равна 1 см, толщину у краев можно принять равной нулю.

4.11 Главное фокусное расстояние собирающей линзы в воздухе равно 10 см. Определить, чему оно равно: 1) в воде; 2) в коричном масле.

4.12 У линзы, находящейся в воздухе, фокусное расстояние 5 см, а погруженной в раствор сахара 35 см. Определить показатель преломления раствора.

4.13 Тонкая линза, помещенная в воздухе, обладает оптической силой 5 дптр, а в некоторой жидкости - 0,48 дптр. Определить показатель преломления жидкости, если показатель преломления стекла, из которого изготовлена линза, равен 1,52.

4.14 В вогнутое сферическое зеркало радиусом 20 см налит тонким слоем глицерин. Определить главное фокусное расстояние такой системы.

4.15 Плосковыпуклая линза имеет оптическую силу 4 дптр. Выпуклую поверхность линзы посеребрили. Найти оптическую силу такого сферического зеркала.

4.16 Поверх выпуклого сферического зеркала радиусом кривизны 20 см налили тонкий слой воды. Определить главное фокусное расстояние такой системы.

4.17 Человек без очков читает книгу, располагая ее перед собой на расстоянии 12,5 см. Какой оптической силы очки следует ему носить?

4.18 Пределы аккомодации глаза близорукого человека без очков лежат между 16 см и 80 см. В очках он хорошо видит удаленные предметы. На каком минимальном расстоянии он может держать книгу при чтении в очках?

4.19 Лупа, представляющая собой двояковыпуклую линзу, изготовлена из стекла с показателем преломления 1,6. Радиусы кривизны поверхностей линзы одинаковы и равны 12 см. Определить увеличение  $\Gamma$  лупы.

4.20 Лупа дает увеличение  $\Gamma = 2$ . Вплотную к ней приложили собирающую линзу с оптической силой 20 дптр. Какое увеличение будет давать такая составная лупа?

4.21 Оптическая сила объектива телескопа равна 0,5 дптр. Окуляр действует как лупа, дающая увеличение 10. Какое увеличение дает телескоп?

4.22 При окуляре с фокусным расстоянием 50 мм телескоп дает угловое увеличение 60. Какое угловое увеличение даст один



объектив, если убрать окуляр и рассматривать действительное изображение, созданное объективом, невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения?

4.23 Фокусное расстояние объектива телескопа равно 1 м. В телескоп рассматривали здание, находящееся на расстоянии 1 км. В каком направлении и на сколько нужно передвинуть окуляр, чтобы получить резкое изображение в двух случаях: 1) если после здания будут рассматривать Луну; 2) если вместо Луны будут рассматривать близкие предметы, находящиеся на расстоянии 100 м?

4.24 Телескоп наведен на Солнце. Фокусное расстояние объектива телескопа равно 3 м. Окуляр с фокусным расстоянием 50 мм проецирует действительное изображение Солнца, созданное объективом, на экран, расположенный на расстоянии 60 см от окуляра. Плоскость экрана перпендикулярна оптической оси телескопа. Определить линейный диаметр изображения Солнца на экране, если диаметр Солнца на небе виден невооруженным глазом под углом  $32'$ .

4.25 Фокусное расстояние объектива микроскопа равно 8 мм, окуляра 4 см. Предмет находится на 0,5 мм дальше от объектива, чем главный фокус. Определить увеличение микроскопа.

4.26 Фокусное расстояние объектива микроскопа равно 1 см, окуляра 2 см. Расстояние от объектива до окуляра 23 см. Какое увеличение  $\Gamma$  дает микроскоп? На каком расстоянии  $a$  от объектива находится предмет?

4.27 Расстояние между фокусами объектива и окуляра внутри микроскопа равно 16 см. Фокусное расстояние объектива равно 1 мм. С каким фокусным расстоянием следует взять окуляр, чтобы получить увеличение  $\Gamma = 500$ ?

## **Практическое занятие 10**

### **Решение задач на волновую оптику**

*Интерференцией называется явление наложения двух и более волн, в результате которого происходит перераспределение интенсивности волн в пространстве, не изменяющееся со временем.*

Необходимым условием интерференции волн является их когерентность, т. е. согласованность во времени и пространстве нескольких волновых процессов. Этому условию удовлетворяют

*монохроматические* волны – неограниченные в пространстве волны одной постоянной амплитуды и частоты. Кроме этого, для интерференции необходимо, чтобы колебания векторов  $\vec{E}$  в накладываются волнах совершались вдоль одного и того же или близких направлений.

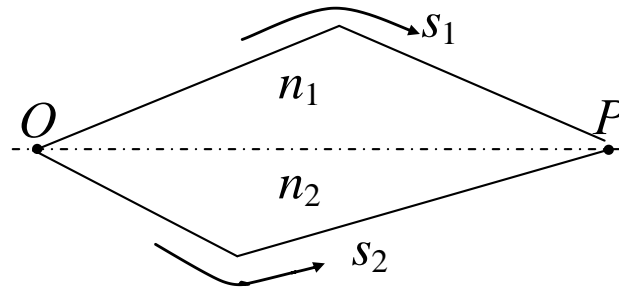


Рис. 10. Условие усиления света

Когерентные световые волны можно получить, разделив (с помощью отражений или преломлений) волну, излучаемую одним источником, на две части. Если заставить эти две волны пройти разные *оптические пути* (в однородной среде оптическая длина пути равна произведению геометрической длины пути  $S$  на показатель преломления среды  $n$ :  $L = n s$ ), а потом наложить друг на друга в определенной точке пространства, то наблюдается интерференция.

Если оптическая разность ход, равная разности оптических длин  $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$  равна целому числу длин волн в вакууме:

$$\Delta = \pm m \lambda_0; \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (13)$$

то разность фаз оказывается кратной  $2\pi$  и колебания, возбуждаемые в точке Р обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе. Таким образом, (13) – это *условие наблюдения интерференционного максимума*.

Если  $\Delta$  равна полуцелому числу длин волн в вакууме:

$$\Delta = \pm \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda_0; \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (14)$$

то разность фаз  $(2m+1)\pi$ , то есть колебания в точке Р будут происходить в противофазе. Следовательно, (14) – *условие наблюдения интерференционного минимума*.

В практических расчетах при определении оптической разности хода следует учитывать, что при отражении световой волны от оптически более плотной среды (то есть при отражении волны от границы раздела со средой, имеющей больший показатель преломления  $n_2$ , чем показатель преломления  $n_1$  среды, в которой волна распространялась до сих пор) фаза волны изменяется на  $\pi$ . Ее можно учесть, добавив к  $\Delta$  половину длины волны в вакууме.

Таким образом, при наложении когерентных волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, в других – минимумы интенсивности. Это явление называется интерференцией волн.

*Дифракцией называется огибание волнами препятствий.* Дифракция проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых волн и проникновении их в область геометрической тени. Обнаруживается картина дифракции вследствие наложения отклоненных лучей и их интерференции. Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса – Френеля и метода зон Френеля.

Чтобы получить четкую дифракционную картину, применяют ряд параллельных узких щелей, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Такое устройство называют *дифракционной решеткой*, изготавливаемой нанесением алмазным резцом царапин – штрихов (непрозрачные промежутки) на стеклянной пластинке. Промежутки между царапинами являются щелями. Хорошие дифракционные решетки имеют до 2 000 штрихов на 1 мм. Рассмотрим дифракционную картину на примере двух щелей (рис. 11).

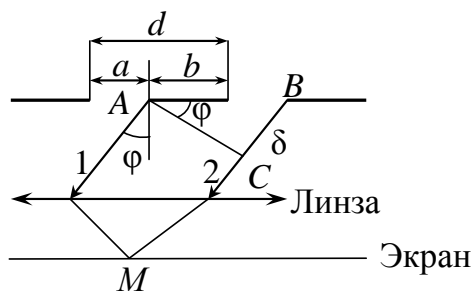


Рис. 11



Сумма ширины щели и непрозрачного промежутка называется *постоянной (периодом)* дифракционной решетки  $d$ :

$$d = a + b.$$

В пределах всей решетки параметр  $d$  одинаков, поэтому для выбранного направления  $\varphi$  вторичных монохроматических лучей 1 и 2, идущих из двух соседних щелей, разность хода  $\delta = d \sin \varphi$  тоже одинакова. Если эта разность хода кратна четному числу длин полуволн, т. е.

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (15)$$

то в соответствующей точке  $M$  экрана наблюдается усиление интенсивности света. Свет от других щелей увеличивает интенсивности максимумов. Выражение (15) является *условием главных максимумов* для решетки.

В тех направлениях, в которых ни одна из щелей не распространяет свет, он не распространяется и при двух щелях, т. е. положения прежних (главных) минимумов определяется условием (47). Кроме того, вследствие интерференции световых лучей, идущих от двух щелей, в некоторых направлениях эти лучи гасят друг друга; так возникают *дополнительные минимумы* с условием

$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (16)$$

Таким образом, полная дифракционная картина дифракции света на двух щелях определяется условиями:

$d \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  – главные максимумы;

$a \sin \varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  – главные минимумы;

$d \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$  – дополнительные минимумы,

т. е. между двумя главными максимумами располагается один дополнительный минимум.

Если дифракционная решетка имеет  $N$  щелей, то между двумя главными максимумами располагается  $N - 1$  дополнительных минимумов, разделенных вторичными максимумами, интенсивность которых невелика. Чем больше щелей  $N$ , тем больше света проходит через решетку и тем больше интенсивность главных максимумов.

Из формулы (16) видно, что лучи различной длины волны имеют максимумы в разных направлениях  $\varphi$ . Следовательно, белый свет, проходя через решетку, разлагается в спектр. Но в направлении  $\varphi = 0$  линза собирает лучи всех длин волн; они имеют нулевую разность хода и, накладываясь, дают самый интенсивный центральный ( $m = 0$ ) максимум белого цвета. Справа и слева от главного максимума для каждого значения  $m$  наблюдаются группы максимумов, которым соответствуют свои длины волн – спектр (рис. 12; изображена дифракционная картина справа от главного максимума, слева картина симметричная). Фиолетовая область спектра обращена к главному максимуму, красная – дальше от него. Расстояние между максимумами увеличивается с ростом порядка спектра, но интенсивность при этом уменьшается. Растянутость спектра на экране характеризуется угловой дисперсией.

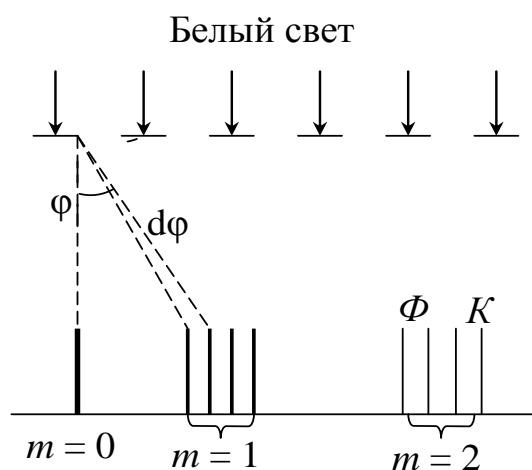


Рис. 12

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}.$$

### Примеры решения задач

**Пример 5.** На пути одного из интерферирующих лучей помещена тонкая стеклянная пластинка, вследствие чего центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое шестой светлой полосой (не считая центральной). Луч падает на пластинку перпендикулярно. Показатель преломления пластинки  $n = 1,6$ , длина волны  $\lambda = 660$  нм. Какова толщина пластинки?

Дано:	Решение:
$n = 1,6$	Стеклопластинка изменяет разность хода интерферирующих лучей на величину $\Delta = nd - d$ . С другой стороны, при внесении пластинки произошло смещение интерференционной картины на $\Delta m = 5$ полос. Следовательно:
$\lambda = 660 \text{ нм}$	
$\Delta m = 5$	
$d = ?$	

$$\Delta = \Delta m \lambda \quad \text{или} \quad d(n - 1) = \Delta m \lambda,$$

откуда 
$$d = \frac{\Delta m \lambda}{n - 1} = \frac{5 \cdot 6,6 \cdot 10^{-7}}{0,6} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

**Пример 6.** В точку  $A$  на экране, отстоящем от источника  $S$  монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  на расстоянии  $L$  (рис. 13), приходят два луча: луч  $SA$  – непосредственно от источника  $S$  и луч  $SCA$ , отраженный в точке  $C$  от зеркала, параллельного лучу  $SA$ .

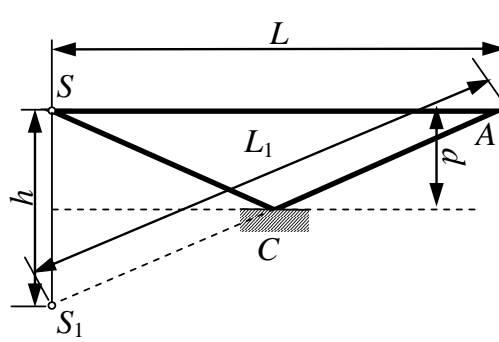


Рис. 13 Ход лучей

Расстояние от луча  $SA$  до плоскости зеркала  $d = 5 \text{ мм}$ . Определить, что будет наблюдаться в точке  $A$ , если  $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ,  $L = 1 \text{ м}$ .

Дано:	Решение:
$d = 5 \text{ мм}$	Построим мнимое изображение $S_1$ источника $S$ в зеркале. Источники $S$ и $S_1$ являются когерентными, поэтому при сложении волн, пришедших от этих источников, на экране будет возникать интерференционная картина. Оптическая разность хода лучей
$\lambda = 0,5 \text{ мкм}$	
$L = 1 \text{ м}$	
$\min, \max - ?$	

$$\Delta = \Delta L + \frac{\lambda}{2},$$

где  $\Delta L = L_1 - L_2$  – геометрическая разность хода лучей 1 и 2 (оба луча распространяются в воздухе);  $\lambda/2$  – дополнительная разность хода, обусловленная изменением фазы колебаний на  $\pi$  при отражении от более плотной среды. Из рис. 3.12 очевидно, что  $h = 2d$  и  $L_2 = L$ , тогда

$$L_1 = \sqrt{L^2 + h^2} = L \sqrt{\left(\frac{h}{L}\right)^2 + 1}; \quad \Delta L = L \left[ \sqrt{\left(\frac{h}{L}\right)^2 + 1} - 1 \right].$$

Величина  $h/L \ll 1$ , поэтому можно считать, что

$$\left[ \left(\frac{h}{L}\right)^2 + 1 \right]^{1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{L}\right)^2.$$

Таким образом: 
$$\Delta = \frac{L}{2} \left(\frac{h}{L}\right)^2 + \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2} \frac{h^2}{L} + \frac{\lambda}{2}.$$

Если оптическая разность хода  $\Delta = m\lambda$ , получаем интерференционный максимум.

Если  $\Delta = (2m+1)\lambda/2$ , получаем интерференционный минимум. Согласно данным задачи:

$$\frac{\frac{h^2}{2L} + \frac{\lambda}{2}}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{h^2}{L\lambda} + 1 = 2 \cdot 10^2 + 1 = 201.$$

На оптической разности хода укладывается нечетное число полуволн, значит, в точке  $A$  будет интерференционный минимум.

**Пример 7.** Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda = 0,60$  мкм падает нормально на щель шириной  $b = 0,04$  мм (рис. 4.3). За щелью находится собирающая линза ( $F = 40$  см), в фокальной плоскости которой расположен экран наблюдения. Определить положение минимумов первого и второго порядков на экране.

Дано:

$$b = 0,04 \text{ мм}$$

$$F = 40 \text{ см}$$

$$\lambda = 0,6 \text{ мкм}$$

$$m_1 = 1$$

$$m_2 = 2$$

$$x_1, x_2 - ?$$

Решение:

В точку  $x = 0$  – главный фокус линзы – приходят лучи, идущие под углом  $\varphi = 0$ , т. е. в этой точке – центральный максимум. Координата любой точки на экране, в которую приходят лучи с углом дифракции  $\varphi$   $x = f \operatorname{tg} \varphi$ .

Условие дифракционных минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально  $b \sin \varphi = \pm m \lambda$ .

Для минимумов первого и второго порядков углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  удовлетворяют условию

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{b} = 0,015; \quad \sin \varphi_2 = \frac{2\lambda}{b} = 0,030.$$

Полученные значения синусов настолько малы, что можно считать  $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi$ . Тогда координаты минимумов первого и второго порядков

$$x_1 = f \sin \varphi_1 = \pm 6 \text{ мм}, \quad x_2 = f \sin \varphi_2 = \pm 12 \text{ мм}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

5.1. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга 0,5 мм ( $\lambda = 0,628$  мкм). Определить расстояние  $\ell$  от щелей до экрана, если ширина интерференционных полос  $\Delta x = 1,3$  мм.

5.2. Сколько длин волн монохроматического света с частотой колебаний  $\nu = 5,1014$  Гц уложится на пути длиной  $\ell = 1$  см:

а) в вакууме; б) в стекле?

5.3. На пути монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм находится плоскопараллельная стеклянная пластина толщиной  $d = 0,15$  мм. Свет падает на пластину нормально. На какой угол  $\varphi$  следует повернуть пластину, чтобы оптическая длина пути  $L$  изменилась на  $\lambda/2$ ?

5.4. Найти все длины волн видимого света (диапазон от 0,76 до 0,38 мкм), которые будут: 1) максимально усилены; 2) максимально ослаблены при оптической разности хода интерферирующих волн  $\Delta = 1,8$  мкм.

5.5. В опыте Юнга тонкая стеклянная пластинка помещалась на пути одного из интерферирующих лучей, вследствие чего центральная светлая полоса смещалась в положение, первоначально занятое 5-й светлой полосой (не считая центральной). Луч

падает на пластинку перпендикулярно ( $n = 1,5$ ;  $\lambda = 630$  нм). Какова толщина пластины?

5.6. Расстояние  $d$  между двумя щелями в опыте Юнга равно 1 мм, расстояние  $\ell$  от щелей до экрана равно 3 м. Определить длину волны  $\lambda$ , испускаемой источником монохроматического света, если ширина  $b$  полос интерференции на экране равна 1,5 мм.

5.7. В опыте с зеркалами Френеля расстояние  $d$  между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние  $\ell$  от них до экрана равно 3 м. Длина волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Определить ширину  $b$  полос интерференции на экране.

5.8. Голубые лучи с длиной волны 480 нм от двух когерентных источников, расстояние между которыми 120 мкм, падают на экран. Расстояние от источника света до экрана 3,6 м. Вследствие интерференции на экране получают чередующиеся темные и светлые полосы. Определить расстояние между центрами 2-х соседних полос на экране. Чему будет равно это же расстояние, если голубые лучи заменить оранжевыми с длиной волны 650 нм?

5.9. Расстояние  $d$  между двумя когерентными источниками света ( $\lambda = 515$  нм) равно 0,1 мм. Расстояние между интерференционными полосами на экране в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определить расстояние  $\ell$  от источников до экрана.

5.10. Свет от лазера с длиной волны  $\lambda = 630$  нм падает по нормали к непрозрачной поверхности, имеющей две узкие параллельные щели, расстояние между которыми  $d = 0,5$  мм. Определить ширину интерференционных полос  $\Delta x$  на экране, находящемся в вакууме на удалении  $\ell = 1$  м от плоскости щелей.

5.11. На плоскопараллельную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$  под углом  $\varphi = 45^\circ$  падает параллельный пучок белого света. Определить, при какой наименьшей толщине пленки отраженный свет окрасится в желтый свет ( $\lambda = 0,6$  мкм).

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

5.13. Найти наименьшую толщину мыльной пленки, при которой наблюдается максимальная освещенность пленки в отраженном свете. Свет с длиной волны  $\lambda = 440$  нм падает нормально на поверхность пленки ( $n = 1,3$ ).

5.14. На поверхность толстой стеклянной пластинки ( $n_1 = 1,5$ ) нанесена очень тонкая прозрачная пленка ( $n_2 = 1,4$ ). На пленку падает из воздуха монохроматический свет ( $\lambda = 628$  нм) нормально к поверхности пленки. Отраженный свет имеет минимальную яркость вследствие интерференции. Какова толщина пленки?

5.15. На мыльную пленку перпендикулярно к ее поверхности падает монохроматический свет с частотой  $\nu = 5 \cdot 10^{14}$  Гц. Скорость распространения света в мыльном растворе равна  $V = 2,3 \cdot 10^8$  м/с. При какой минимальной толщине пленки отраженные лучи дадут в результате интерференции максимальную яркость?

5.16. Какова толщина мыльной пленки, освещенной белым светом, если при наблюдении ее в отраженном свете она представляется зеленой ( $\lambda = 515$  нм), когда угол между нормалью и лучом зрения  $35^\circ$ ? Показатель преломления мыльной воды принять 1,33.

5.17. Пучок света падает нормально на стеклянную пластинку, толщина которой 0,4 мкм. Показатель преломления стекла 1,5. Какие длины волн, лежащие в пределах видимого спектра (от 400 нм до 700 нм), усиливаются в отраженном пучке?

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

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

5.20. На толстую стеклянную пластинку, покрытую тонкой пленкой ( $n = 1,4$ ), падает нормально пучок монохроматического



света ( $\lambda = 515$  нм). Определить толщину пленки, если отраженный свет максимально ослаблен.

5.21. На щель шириной  $a = 0,1$  мм падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,5$  мкм). За щелью помещена собирающая линза, в фокальной плоскости которой находится экран. Что будет наблюдаться на экране, если угол дифракции равен  $43^\circ$ .

5.22. На щель шириной  $a = 2$  мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 589$  нм). Под какими углами будут наблюдаться дифракционные минимумы света?

5.23. На щель шириной  $a = 10$  мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 0,628$  мкм. Под каким углом  $\varphi$  будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

5.24. На узкую щель шириной  $a = 0,05$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 694$  нм. Определить направление на вторую светлую дифракционную полосу.

5.25. На щель шириной  $a = 0,12$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм. Экран, на котором наблюдается дифракционная картина, расположен параллельно щели на расстоянии  $L = 1,2$  м. Определить расстояние  $b$  между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума.

5.26. На щель шириной  $a = 0,1$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном параллельно щели. Определить расстояние  $L$  от щели до экрана, если ширина центрального дифракционного максимума  $b = 1$  см.

5.27. Монохроматический свет с длиной волны  $0,63$  мкм падает на длинную прямоугольную щель шириной  $a = 12$  мкм под углом  $\varphi = 45^\circ$  к ее нормали. Определить угловое положение первых минимумов, расположенных по обе стороны от центрального максимума.

5.28. Монохроматический свет падает на длинную прямоугольную щель шириной  $a = 12$  мкм под углом  $30^\circ$  к ее нормали. Определить длину волны  $\lambda$  света, если направление на первый минимум от центрального максимума составляет  $33^\circ$ .



5.29. Какое число штрихов  $N$  на единицу длины имеет дифракционная решетка, если зеленая линия ртути ( $\lambda = 546,1$  нм) в спектре первого порядка наблюдается под углом  $\varphi = 19^\circ$ ? Найти наибольший порядок  $m$  спектра для желтой линии натрия ( $\lambda = 589$  нм), если постоянная дифракционной решетки  $d = 2$  мкм

5.30. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 630$  нм. Определить наибольший порядок спектра, полученный с помощью этой решетки, если ее постоянная  $d = 2$  мкм.

5.31. Определить число штрихов на 1 мм дифракционной решетки, если углу  $\varphi = 30^\circ$  соответствует максимум четвертого порядка для монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм.

5.32. Монохроматический свет нормально падает на дифракционную решетку. Определить угол дифракции, соответствующий максимуму четвертого порядка, если максимум третьего порядка наблюдается под углом  $15^\circ$ .

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

5.34. Дифракционная решетка освещена нормально падающим монохроматическим светом. В дифракционной картине максимум второго порядка отклонен на угол  $\varphi_1 = 14^\circ$ . На какой угол  $\varphi_2$  отклонен максимум третьего порядка?

5.35. Дифракционная решетка содержит  $n = 200$  штрихов на 1 мм. На решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,628$  мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

5.36. На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол  $\varphi$  дифракции, соответствующий последнему максимуму.

5.37. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг

друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ( $\lambda = 0,4$  мкм) спектра третьего порядка?

5.38. На дифракционную решетку с периодом  $d = 10$  мкм под углом  $\varphi = 30^\circ$  падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 630$  нм. Определить угол  $\beta$  дифракции, соответствующий второму главному максимуму.

## **Практическое занятие 11**

### **Решение задач на элементы СТО**

В первую очередь в СТО, как и в классической механике, предполагается, что пространство и время однородны, а пространство также изотропно.

Постулат 1 (принцип относительности Эйнштейна). Законы природы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Это означает, что форма зависимости физических законов от пространственно-временных координат должна быть одинаковой во всех ИСО, то есть законы инвариантны относительно переходов между ИСО. Принцип относительности устанавливает равноправие всех ИСО.

Постулат 2 (принцип постоянства скорости света). Скорость света в вакууме одинакова во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

Принцип постоянства скорости света противоречит классической механике (закону сложения скоростей). Таким образом, из справедливости второго постулата следует, что время должно быть относительным — неодинаковым в разных ИСО. Необходимым образом отсюда следует и то, что «расстояния» также должны быть относительны.

Длина стержня  $l_0$  сокращается в направлении скорости движения  $v$ :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (17)$$

Релятивистское сложение скоростей  $v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v' v_0}{c^2}} l_0$ .

Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (18)$$

Полная энергия релятивистской частицы

$$E = mc^2 = m_0 c^2 + E_{\text{кин}}, \quad (19)$$

где  $E_{\text{кин}}$  – кинетическая энергия частицы,  $E_0 = m_0 c^2$  – ее энергия покоя.

### Задачи для самостоятельного решения

6.1. Какова масса протона, летящего со скоростью  $2,4 \cdot 10^8$  м/с? Массу покоя протона считать равной 1 а.е.м.

6.2. На сколько увеличится масса  $\alpha$ -частицы при увеличении ее скорости от 0 до 0,9 с? Полагать массу покоя  $\alpha$ -частицы равной 4 а.е.м.

6.3. С какой скоростью должен лететь протон (1 а.е. м.), чтобы его масса равнялась массе покоя  $\alpha$ -частицы (4 а.е.м.)?

6.4. Мощность общего излучения Солнца равна  $3,83 \cdot 10^{28}$  Вт. Насколько в связи с этим уменьшается каждую секунду масса Солнца?

6.5. Груз массой 18 т подъемный кран поднял на высоту 5 м. Насколько изменилась масса груза?

6.6. Насколько увеличится масса пружины жесткостью 10 кН/м при ее растяжении на 3 см?

6.7. Масса покоящегося поезда равна 2000 т. На сколько увеличивается его масса при движении со скоростью 15 м/с?

6.8. Два тела массами по 1 кг, находящиеся достаточно далеко друг от друга, сблизил, приведя их в соприкосновение. Будет ли суммарная масса тел равна 2 кг?

6.9. Чайник с 2 л воды нагрели от 10 °С до кипения. На сколько изменилась масса воды?

6.10. Насколько изменяется масса 1 кг льда при плавлении?

6.11. Насколько отличается масса покоя продуктов сгорания

1 кг каменного угля от массы покоя веществ, вступающих в реакцию?

6.12. Во сколько раз увеличивается масса протонов, если на Серпуховском ускорителе Института физики высоких энергий они приобретают энергию 76 ГэВ?

6.13. Ускоритель Ереванского физического института позволяет получать электроны с энергией 6 ГэВ. Какова масса таких электронов и во сколько раз она больше массы покоя?

6.14. Найти кинетическую энергию электрона (МэВ), движущегося со скоростью 0,6  $c$ .

### **Самостоятельная работа обучающихся**

#### **«Использование интерференции в науке и технике»**

Студенты должны изучить содержание параграфов в учебниках [1] §181, [2] 19.4. Законспектировать основное содержание параграфов и ответить на следующие вопросы:

1. Что такое интерференция?
2. Как используют свойства интерференции света для определения линейных размеров тел?
3. Как используют свойства интерференции света для определения состава газов?
4. Как используют свойства интерференции света для определения скорости света?
5. Перечислите области применения интерференции?

#### **Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра**

Квантовая и атомная физика – это физика микромира, которая связана с особенностями существования и превращениями объектов, размеры которых составляют порядка  $10^{-9}$  м. В этой связи временные уравнения движения частиц, полученные в классической физике, не могут быть применены для описания состояния частиц микромира. Поэтому на рубеже XIX–XX веков в физике возникло новое направление – квантовая физика, позволившая теоретически объяснить ряд законов и явлений.

Законы квантовой физики отвечают принципу соответствия, т. е. они не являются чем-то исключительным и при определённых условиях переходят в законы классической физики.

Важным этапом в развитии физики явилось открытие явления квантования энергии микросистем и появление новой безмассовой и нейтральной частицы – фотона, являющейся переносчиком электромагнитного взаимодействия.

Квантовая механика и теория де Бройля позволили объяснить существование стационарных боровских орбит, при движении электрона по которым атом не излучает энергию, так как движущейся по орбите частице можно поставить в соответствие волну определённой длины, причём на длине боровских стационарных орбит их укладывается целое число.

## Практическое занятие 12

### Решение задач на распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела

*Тепловым называется излучение, обусловленное нагреванием тел.* Оно свойственно всем телам при температуре выше 0 К. При низких температурах излучаются длинные (инфракрасные) волны, при высоких – короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны.

Тепловое излучение является единственным видом *равновесного излучения*. Предположим, что нагретое тело находится внутри откачанной оболочки с идеально отражающими стенками. Между телом и его излучением, отраженным стенками, устанавливается термодинамическое равновесие: в единицу времени тело поглощает столько же энергии, сколько и излучает.

*Энергия, излучаемая единицей площади поверхности тела за единицу времени в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ , называется энергетической светимостью  $R_T$ , Дж/м<sup>2</sup>·с:*

Тело, способное поглощать полностью все падающее на него излучение любой частоты, называется *абсолютно черным* (а.ч.т.). Поглощательная способность а.ч.т.  $(A_{T,\nu}^r)$  для всех частот и температур тождественно равна единице  $(A_{T,\nu}^r \equiv 1)$ . Абсолютно черных тел в природе нет, однако хорошей моделью а.ч.т. может служить замкнутая полость с небольшим отверстием и зачерненной внутренней поверхностью («черный ящик»). Луч света, попавший внутрь полости, при многократных отражениях от

черных стенок практически полностью поглощается. Тела, у которых  $A_{T,\nu} < 1$ , называются *серыми*.

Связь между спектральной плотностью энергетической светимости и поглотительной способностью тел установлена Кирхгофом: *отношение спектральной плотности энергетической светимости к поглотительной способности одинаково для всех тел и является универсальной функцией частоты и температуры  $r_{T,\nu}$* :

$$\frac{R_{T,\nu}}{A_{T,\nu}} = r_{T,\nu}. \quad (20)$$

Для а.ч.т.  $A_{T,\nu}^r \equiv 1$ , поэтому  $R_{T,\nu}^r = r_{T,\nu}$ , т. е. универсальная функция Кирхгофа  $r_{T,\nu}$  имеет смысл спектральной плотности энергетической светимости а.ч.т.

Энергетическую светимость а.ч.т. обозначают  $R_e$ . Согласно закону Стефана – Больцмана энергетическая светимость а.ч.т. пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры

$$R_e = \sigma T^4, \quad (21)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт / (м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана – Больцмана.

Опыты показали, что зависимость энергии излучения от его частоты нелинейная: при заданной температуре спектральная плотность энергетической светимости а.ч.т. при увеличении частоты увеличивается, достигая отчетливо выраженного максимума при некоторой частоте  $\nu_m$ , а затем уменьшается (рис. 16).

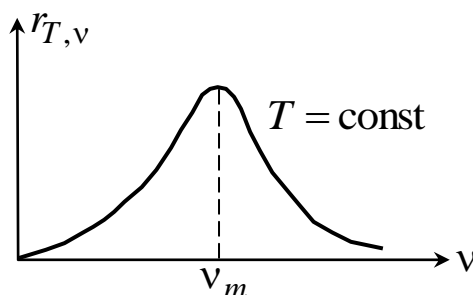


Рис. 16

При повышении температуры  $r_{T,\nu}$  возрастает в соответствии с законом Стефана – Больцмана, но вместе с тем наблюдается смещение максимума графика в сторону больших частот (рис. 17).

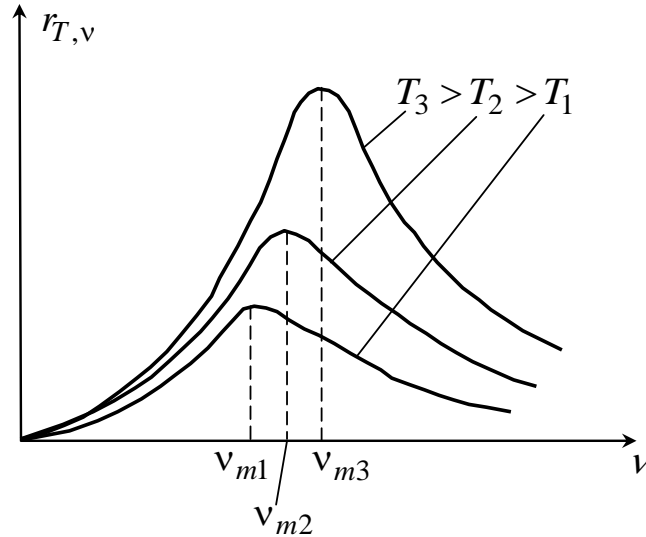


Рис. 17

Характер этого смещения установлен Вином:

$$\nu_m = b_1 T$$

– частота, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости а.ч.т., пропорциональна термодинамической температуре. Закон смещения Вина можно записать для  $\lambda_m$ :

$$\lambda_m = \frac{b}{T}. \quad (22)$$

Коэффициенты пропорциональности  $b_1$  и  $b$  называются *постоянными Вина*;  $b = 2,90 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ,  $b' = c/b$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

*Закон смещения Вина* объясняет, почему, например, при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (переход от белого каления в красное при остывании металла).

Законы Стефана – Больцмана и Вина являются эмпирическими. Для теоретического обоснования этих законов были предприняты многочисленные попытки, основанные на положениях классической физики: но расчет энергетической светимости



а.ч.т. с использованием классической теории дает абсурдный результат. Трудности в изучении законов излучения а.ч.т. с точки зрения классической физики получили название «ультрафиолетовой катастрофы».

Выход из указанных трудностей был найден в 1900 г. немецким физиком Максом Планком. Планк высказал гипотезу о том, что *энергия радиационного осциллятора может принимать лишь определенные дискретные значения, кратные элементарной порции энергии  $\varepsilon$* . Величина  $\varepsilon$  – квант энергии, пропорциональна частоте  $\nu$ :

$$\varepsilon = h\nu, \quad (23)$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Формула спектральной плотности энергетической светимости а.ч.т. принимает вид

$$r_{T,\nu} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1}. \quad (24)$$

Формула Планка согласуется с экспериментальными результатами. Кроме того, из нее можно получить законы Стефана – Больцмана и Вина.

### Примеры решения задач

**Пример 8.** Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны 500 нм. Считая, что Солнце излучает как чёрное тело, определить: 1) энергетическую светимость  $R_\Sigma$  Солнца; 2) поток энергии  $\Phi$ , излучаемой Солнцем; 3) массу  $m$  электромагнитных волн, излучаемых Солнцем за 1 с;

Дано: $\lambda_m = 500$ нм $R_\Sigma, \Phi, m, I - ?$	Решение 1. Энергетическая светимость чёрного тела определяется законом Стефана – Больцмана $R_\Sigma = \sigma T^4$ , а температура излучающей поверхности чёрного тела определяется из закона смещения Вина $\lambda_m = \frac{b}{T}$ :
---	--

$$T = \frac{b}{\lambda_m}.$$

После подстановки, получим

$$R_{\text{э}} = \sigma \frac{b^4}{\lambda_m^4} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (2,9 \cdot 10^{-3})^4}{(5 \cdot 10^{-7})^4} = 64 \cdot 10^6 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

2. Поток энергии  $\Phi$  (мощность излучения) равен произведению энергетической светимости Солнца на площадь  $S$  его поверхности

$$\Phi = R_{\text{э}} \cdot 4\pi r_{\text{С}}^2,$$

где  $r_{\text{С}} = 6,95 \cdot 10^8$  м – радиус Солнца.

$$\Phi = 64 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (6,95 \cdot 10^8)^2 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ (Вт)}.$$

3. Масса  $m$  электромагнитных волн всех длин, излучаемых Солнцем ежесекундно, определяется из соотношения Эйнштейна о пропорциональности массы и энергии

$$E = mc^2,$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость электромагнитных волн в вакууме. Так как энергия электромагнитных волн, излучаемых за время  $t$ , равна произведению потока энергии (мощности излучения) на время  $t$ , то за одну секунду излучается энергия, численно равная потоку излучения:  $\Phi = mc^2$ .

Откуда

$$m = \frac{\Phi}{c^2} = \frac{3,9 \cdot 10^{26}}{9 \cdot 10^{16}} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ (кг/с)}.$$

**Пример 9.** При изменении температуры чёрного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda, T}^{\text{max}}$  сместился с  $\lambda_1 = 2,5$  мкм на  $\lambda_2 = 0,5$  мкм. Во сколько раз изменилась энергетическая светимость  $R_{\text{э}}$  нагретого тела?

Дано:

$$\lambda_1 = 2,5 \text{ мкм}$$

$$\lambda_2 = 0,5 \text{ мкм}$$

$$\frac{R_{\text{э}2}}{R_{\text{э}1}}; \frac{r_{\lambda_2, T_2}^{\text{max}}}{r_{\lambda_1, T_1}^{\text{max}}} - ?$$

Решение:

При повышении температуры излучающего абсолютно чёрного тела от  $T_1$  до  $T_2$  происходит уменьшение длины волны. Температуры  $T_1$  и  $T_2$  можно определить из закона смещения Вина  $\lambda_1 = \frac{b}{T_1}$ ;  $\lambda_2 = \frac{b}{T_2}$ ,

отсюда

$$T_1 = \frac{b}{\lambda_1}; \quad T_2 = \frac{b}{\lambda_2}.$$

Энергетическая светимость  $R_\Sigma$  чёрного тела выражается из закона Стефана – Больцмана (1.9):

$$R_\Sigma = \sigma T^4,$$

поэтому

$$\frac{R_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 1}} = \frac{\sigma T_2^4}{\sigma T_1^4} = \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 = 625.$$

### Задачи для самостоятельного решения

7.1. Чёрное тело имеет температуру  $T_1 = 500$  К. Какова будет температура  $T_2$  тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в  $n = 5$  раз?

7.2. Температура чёрного тела  $T = 2$  кК. Определить длину волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda, T}$ , и спектральную плотность  $r_{\lambda, T}^{\max}$  энергетической светимости для этой длины волны.

7.3. Определить температуру  $T$  и энергетическую светимость  $R_\Sigma$  чёрного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda, T}^{\max}$  приходится на длину волны  $\lambda_m = 600$  нм.

7.4. Из смотрового окошечка печи излучается поток  $\Phi = 4$  кДж/мин. Определить температуру  $T$  печи, если площадь окошечка  $S = 8$  см<sup>2</sup>.

7.5. Поток излучения чёрного тела  $\Phi = 10$  кВт. Максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda, T}^{\max}$  приходится на длину волны  $\lambda_m = 0,8$  мкм. Определить площадь  $S$  излучающей поверхности.

7.6. Как и во сколько раз изменится поток излучения чёрного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda, T}^{\max}$  переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{m1} = 780$  нм) на фиолетовую ( $\lambda_{m2} = 390$  нм)?

7.7. Муфельная печь, потребляющая мощность  $P = 1,2$  кВт, имеет отверстие площадью  $S = 150$  см<sup>2</sup>. Определить долю мощности, рассеиваемой стенками печи, если температура её внутренней поверхности равна 1 кК.

7.8. Средняя энергетическая светимость  $\langle R_\varepsilon \rangle$  поверхности Земли равна 0,54 Дж/(см<sup>2</sup> · мин). Какова должна быть температура  $T$  поверхности Земли, если условно считать, что она излучает как серое тело с коэффициентом черноты  $\alpha_T = 0,25$ ?

7.9. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны  $\lambda = 500$  нм. Принимая Солнце за чёрное тело, определить энергетическую светимость  $R_\varepsilon$  Солнца и поток  $\Phi$  излучаемой им энергии.

7.10. Максимальная спектральная плотность энергетической светимости чёрного тела  $r_{\lambda,T}^{\max} = 4,16 \cdot 10^{11} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$ . На какую длину волны  $\lambda_{\max}$  она приходится?

### Практическое занятие 13

#### Решение задач на волновые свойства микрочастиц

Рассмотренные ранее явления интерференции, дифракции убедительно обосновываются волновой (электромагнитной) теорией. Ряд других физических процессов – тепловое излучение, фотоэффект – удалось объяснить на основе квантовых представлений на природу света. В науке создалась непростая ситуация, однако выход из нее был найден на пути осознания не противопоставления совершенно разных точек зрения на природу света, а их единства. *Свет одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных частиц – фотонов.* Но в проявлении этих противоположных свойств света наблюдается определенная закономерность: чем короче длина волны, тем слабее проявляются волновые свойства и отчетливее выступают квантовые свойства света. Выражения

$\varepsilon = h\nu$  и  $p = \frac{h}{\lambda}$  являются связующими между корпускулярными и волновыми свойствами электромагнитного излучения.

В 1923 г. французский физик Луи де Бройль пришел к выводу, что *двойственная корпускулярно-волновая природа свойственна также и частицам вещества* – электронам, нейтронам, атомам и т. д. Это означает, что частицам вещества, как и фотонам, присущи волновые свойства. Длина волны, связанной с частицей, определяется из формулы:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (25)$$

Это выражение называется *формулой де Бройля*, а  $\lambda$  – *длиной волны де Бройля*.

Волновые свойства у микрочастиц впервые были обнаружены экспериментально в опытах по дифракции пучков электронов на естественных дифракционных решетках – кристаллах никеля в виде тонкой фольги. Позднее подобные опыты подтвердили наличие волновых свойств у нейтронов, протонов, атомных и даже молекулярных пучков.

Волновые свойства у обычных классических частиц, например, у пули массой 1 г, летящей со скоростью 1 м/с, экспериментально не могут быть обнаружены в силу малости длины волны де Бройля ( $\lambda \approx 6 \cdot 10^{-31}$  м). Поэтому принято считать, что макроскопические тела проявляют только одну сторону своих свойств – корпускулярную.

### **Примеры решения задач**

**Пример 10.** Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошёл ускоряющую разность потенциалов  $U$ . Найти длину волны де Бройля электрона для двух случаев: 1)  $U_1 = 51$  В; 2)  $U_2 = 510$  кВ.

*Решение.* Длина волны де Бройля для частицы зависит от её импульса  $p$  и определяется формулой

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

где  $h$  – постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна её кинетическая энергия  $W$ . Связь импульса с кинетической энергией для нерелятивистского случая (когда кинетическая энергия частицы много меньше её энергии покоя) и для релятивистского случая

(когда кинетическая энергия сравнима с энергией покоя частицы) различна.

В нерелятивистском случае

$$p = \sqrt{2m_0W},$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы.

В релятивистском случае

$$p = \frac{\sqrt{(2E_0 + W)W}}{c},$$

где  $E_0 = m_0c^2$  – энергия покоя частицы.

После преобразований формула запишется:

в нерелятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0W}};$$

в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{(2E_0 + W)W}}.$$

Сравним кинетические энергии электрона, прошедшего заданные в условиях задачи разности потенциалов  $U_1 = 51$  В и  $U_2 = 510$  кВ, с энергией покоя электрона и в зависимости от этого решим, какую из формул следует применить для вычисления длины волны де Бройля.

Кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $U$ :

$$W = eU.$$

В первом случае  $W_1 = eU_1 = 51 \text{ эВ} = 0,51 \cdot 10^{-4} \text{ МэВ}$ , что на четыре порядка меньше энергии покоя электрона  $E_0 = m_0c^2 = 0,51 \text{ МэВ}$ . Следовательно, в этом случае можно применить формулу в нерелятивистском случае. Для упрощения расчётов заметим, что  $W_1 = 10^{-4} m_0c^2$ . Подставив это выражение в формулу

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_0 \cdot 10^{-4} \cdot m_0c^2}} = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \frac{h}{m_0c}.$$

Вычислим

$$\lambda_1 = 10^2 \cdot 2,43 / \sqrt{2} = 1,72 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

Во втором случае кинетическая энергия

$$W_2 = eU_2 = 510 \text{ кэВ} = 0,51 \text{ МэВ},$$

т. е. равна энергии покоя электрона. В этом случае необходимо применить релятивистскую формулу. Учитывая, что  $W_2 = 0,51 \text{ МэВ} = m_0 c^2$ , находим

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\sqrt{(2m_0 c^2 + m_0 c^2) m_0 c^2}} = \frac{h}{\sqrt{3} m_0 c}.$$

Произведём вычисления:  $\lambda_2 = \frac{2,43}{\sqrt{3}} = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$

### **Задачи для самостоятельного решения**

8.1. Найти дебройлевскую длину  $\lambda$  для электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода, находящегося в основном состоянии.

8.2. Определить дебройлевскую длину волны  $\lambda$  электрона, находящегося на второй орбите атома водорода.

8.3. С какой скоростью движется электрон, если длина волны  $\lambda$  де Бройля электрона равна его комптоновской длине волны  $\lambda_c$ ?

8.4. Определить длину волны  $\lambda$  де Бройля электронов, бомбардирующих антикатод рентгеновской трубки, если граница сплошного рентгеновского спектра приходится на длину волны  $\lambda = 3 \text{ нм}$ .

8.5. Электрон движется по окружности радиусом  $R = 0,5 \text{ см}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 8 \text{ мТл}$ . Определить длину волны  $\lambda$  де Бройля электрона.

8.6. Какой кинетической энергией  $W_k$  должен обладать электрон, чтобы дебройлевская длина волны  $\lambda$  электрона была равна его комптоновской длине волны  $\lambda_c$ ?

8.7. Масса  $m$  движущегося электрона в два раза больше массы покоя  $m_0$ . Определить длину волны  $\lambda$  де Бройля для такого электрона.

8.8. Кинетическая энергия  $W_k$  электрона равна его энергии покоя  $W_0$ . Вычислить длину волны  $\lambda$  де Бройля для такого элек-



трона.

8.9. Протон обладает кинетической энергией, равной энергии покоя. Во сколько раз изменится длина волны  $\lambda$  де Бройля протона, если его кинетическая энергия увеличится в два раза?

8.10. Кинетическая энергия  $W_k$  электрона равна удвоенному значению его энергии покоя ( $2 m_0 c^2$ ). Вычислить длину волны  $\lambda$  де Бройля для такого электрона.

## Практическое занятие 15

### Решение задач на спектры излучения атома водорода

При бомбардировке тонкой золотой фольги  $\alpha$ -частицами, обладающими большой энергией (заряд  $\alpha$ -частицы равен  $+2e$ ), Э. Резерфорд обнаружил, что основная часть частиц, проходя через фольгу, испытывает незначительные отклонения. Вместе с тем некоторые частицы отклонялись на значительные (до  $135^\circ$ – $150^\circ$  и даже до  $180^\circ$ ) углы  $\varphi$  (рис. 43). Этот факт Резерфорд объяснил взаимодействием  $\alpha$ -частицы с положительным зарядом большой массы. Обобщая эти опыты, Э. Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель строения атома. Согласно этой модели, весь положительный заряд и почти вся масса атома (99,4 %) сосредоточены в атомном ядре, размер которого ( $\sim 10^{-15}$  м) ничтожно мал по сравнению с размером атома ( $\sim 10^{-10}$  м). Вокруг ядра по замкнутым траекториям движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Заряд ядра равен суммарному заряду электронов. Однако такая модель не могла объяснить устойчивость атома, так как криволинейное движение электрона по орбите с центростремительным ускорением должно сопровождаться непрерывным излучением энергии, т. е. ее уменьшением и, как следствие, уменьшением радиуса орбиты и падением электрона на ядро; спектр излучения должен быть сплошным. В действительности атомы – устойчивые системы, и спектр их излучения линейчатый.

Существенный вклад в развитие теории атома водорода внес Н. Бор, предложивший два основных постулата.

1. *Существуют определенные стационарные орбиты, находясь на которых электрон не излучает энергию (постулат стационарных состояний).*

Дозволенные радиусы орбит с номером  $n = 1, 2, 3, \dots$  находятся из следующих соображений: момент импульса электрона может принимать значения, кратные числу  $h/2\pi$ :

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}. \quad (26)$$

Кулоновская сила притяжения между электроном и протоном в атоме водорода является центростремительной силой:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}. \quad (27)$$

Из уравнений (26) и (27) получается выражение для радиуса орбит:

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2}, \quad (28)$$

т. е. радиусы орбит электрона в атоме водорода пропорциональны  $n^2$ . Радиус первой боровской орбиты ( $n = 1$ )  $r_B = 0,528 \cdot 10^{-10}$  м.

2. *При переходе из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии  $h\nu$ , равный разности энергий электрона в этих состояниях:*

$$h\nu = E_2 - E_1. \quad (29)$$

В боровской модели полная энергия атома водорода равна сумме кинетической энергии  $E_K$  вращения электрона и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E_K = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}; \quad E_{\Pi} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}; \quad E = E_K + E_{\Pi} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}. \quad (30)$$

Как видно из соотношений (30), полная энергия отрицательна. Наибольшей энергией атом водорода обладает при  $n = 1$  ( $r_n$  минимальный). Это *основное энергетическое состояние*. Состояния с  $n > 1$  являются *возбужденными*.

Подставив  $r_n$  (28) в (30), получим формулу энергии  $E_n$  на любом энергетическом уровне:

$$E_n = -\frac{m e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (31)$$

Из уравнений (29) и (31) можно рассчитать значение частоты испускаемого или поглощаемого фотона:

$$\nu = \frac{m e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (32)$$

Таким образом, на основании теории Бора можно объяснить наличие линейчатых спектров у атома водорода.

Существование *дискретных энергетических состояний атомов* является одной из самых характерных особенностей их свойств.

### Примеры решения задач

**Пример 11.** Электрон в атоме водорода перешёл с четвёртого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

*Решение.* Для определения энергии фотона воспользуемся серийной формулой для водородоподобных ионов:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (33)$$

где  $\lambda$  – длина волны фотона;  $R$  – постоянная Ридберга;  $Z$  – заряд ядра в относительных единицах (при  $Z = 1$  формула переходит в серийную формулу для водорода);  $n_1$  – номер орбиты, на которую перешёл электрон;  $n_2$  – номер орбиты, с которой перешёл электрон ( $n_1$  и  $n_2$  – главные квантовые числа).

Энергия фотона  $\varepsilon$  выражается формулой

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}.$$

Умножив обе части равенства (33) на  $hc$ , получим выражение для энергии фотона:

$$\varepsilon = Rhc \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Так как  $R_{ch}$  есть энергия ионизации  $E_i$  атома водорода, то

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

Выполним вычисления:  $E_i = 13,6 \text{ эВ}$ ;  $n_1 = 2$ ;  $n_2 = 4$ :

$$\varepsilon = 13,6 \cdot 1^2 \left( \frac{1}{2_1^2} - \frac{1}{4_2^2} \right) = 2,55 (\text{эВ}) = 4,08 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

9.1. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны  $\lambda = 102,6 \text{ нм}$ . Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус  $r_n$  электронной орбиты возбужденного атома водорода.

9.2. Вычислить по теории Бора радиус  $r_2$  второй стационарной орбиты и скорость  $v_2$  электрона на этой орбите для атома водорода.

9.3. Вычислить по теории Бора период  $T$  вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом  $n = 2$ .

9.4. Определить изменение энергии  $\Delta E$  электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с частотой  $6,28 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .

9.5. Во сколько раз изменится период  $T$  вращения электрона в атоме водорода, если при переходе в невозбужденное состояние атом излучил фотон с длиной волны  $\lambda = 97,5 \text{ нм}$ ?

9.6. Определить изменение кинетической энергии электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны  $\lambda = 435 \text{ нм}$ ?

9.7. В каких пределах  $\Delta\lambda$ , должна лежать длина волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света радиус  $r_n$  орбиты электрона увеличился в 16 раз?

9.8. В однозарядном ионе лития электрон перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить длину волны  $\lambda$  излучения, испущенного ионом лития.

9.9. Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определить кинетическую  $W_k$ , потенциаль-

ную  $W_p$  и полную  $W$  энергию электрона.

9.10. Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией  $W_k = 10$  эВ. Определить энергию  $\varepsilon$  фотона.

## Практическое занятие 16

### Решение задач на определение характеристик ионизирующих излучений

Под *радиоактивностью* понимают способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) и элементарных частиц:

$\alpha$ -излучение – поток ядер гелия; заряд  $\alpha$ -частицы равен  $+2e$ , а масса совпадает с массой ядра изотопа  ${}^4_2\text{He}$ ;

$\beta$ -излучение – поток быстрых электронов;

$\gamma$ -излучение – поток фотонов с высокой энергией.

*Закон радиоактивного распада*

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

где  $N_0$  – количество ядер в начальный момент времени ( $t = 0$ );  $N$  – количество *нераспавшихся* ядер к моменту времени  $t$ ;  $\lambda$  – *постоянная радиоактивного распада*, определяет скорость радиоактивного распада (рис. 18).

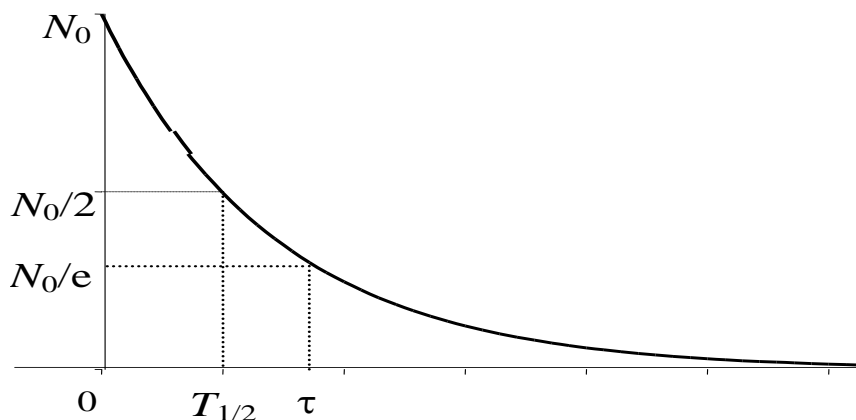


Рис. 18. Зависимость числа  
нераспавшихся радиоактивных ядер от времени

Количество ядер, *распавшихся* за время  $t$ :

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

Доля ядер, распавшихся за некоторый промежуток времени определяется отношением  $\frac{\Delta N}{N_0}$ .

Если интервал времени  $\Delta t$ , за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада  $T_{1/2}$  ( $\Delta t \ll T_{1/2}$ ), то число распавшихся ядер

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

Время, в течение которого распадается половина первоначального количества ядер радиоактивного вещества, называется *периодом полураспада*:

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

Число атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе, определяется соотношением

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

где  $m$  – масса изотопа;  $M$  – его атомная масса;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – постоянная Авогадро.

*Активность радиоактивного препарата* убывает со временем по закону

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

где  $A_0 = \lambda N_0$  – активность радиоактивного препарата в начальный момент времени.

*Среднее время  $\tau$  жизни* радиоактивного изотопа характеризует интервал времени, за который число не распавшихся ядер

уменьшается в « $e \approx 2,72$ » раз  $\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 1,44 T_{1/2}.$

### Примеры решения задач

**Пример 12.** Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного магния  ${}^{27}_{12}\text{Mg}$  массой  $m = 0,2$  мкг и его активность  $A$  через  $t = 1$  ч.

Дано:

$$m_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$$

$$t = 3600 \text{ с}$$

$$T_{1/2} = 600 \text{ с}$$

$$M = 0,027 \text{ кг/моль}$$

$A_0$ ;  $A$  – ?

Решение:

Начальная активность изотопа определяется соотношением  $A_0 = \lambda N_0$ , которое с учетом выражений (20) и (21), примет вид

$$A_0 = \frac{m N_A}{M T_{1/2}} \ln 2.$$

Вычислим начальную активность радиоактивного препарата

$$A_0 = \frac{2 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 0,693}{27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 600 \text{ с}} = 5,15 \cdot 10^{12} \text{ Бк}.$$

Так как активность радиоактивного изотопа уменьшается со временем (22), то получим

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = A_0 (e^{\ln 2})^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{A_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}} = \frac{5,15 \cdot 10^{12} \text{ Бк}}{2^{\frac{3600}{600}}} = 8,05 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

10.1. Определить, какая доля  $\Delta N / N$  первоначального количества ядер изотопа  $^{60}_{27}\text{Co}$  распадается через пять лет.

10.2. Определить число  $\Delta N$  атомов радиоактивного препарата йода  $^{131}_{53}\text{I}$  массой  $m = 0,5$  мкг, распавшихся в течение семи суток.

10.3. За 8 суток распалось  $3/4$  начального количества ядер радиоактивного изотопа. Определить период  $T_{1/2}$  полураспада этого изотопа.

10.4. Определить число ядер  $\Delta N$ , распадающихся в течение 1 минуты в радиоактивном изотопе фосфора  $^{32}_{15}\text{P}$  массой 1 мг.

10.5. Определить, какая доля  $\Delta N / N$  радиоактивного изотопа  $^{192}_{77}\text{Ir}$  распадается за 25 суток.

10.6. Определить число  $N$  атомов, распадающихся в радиоактивном изотопе за время  $t = 10$  с, если его активность  $A = 10^5$  Бк. Считать активность постоянной в течение указанного времени.



10.7. Во сколько раз уменьшится активность  $A$  препарата  $^{32}_{15}\text{P}$  через 20 суток?

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

10.9. На сколько процентов уменьшится активность  $A$  изотопа иридия  $^{27}_{12}\text{Mg}$  за один час?

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

### **Самостоятельная работа обучающихся**

#### **«Спонтанное и вынужденное излучение энергии»**

Студенты должны изучить содержание параграфов в учебниках [1] §207, [2] 21.5. Законспектировать основное содержание параграфов и ответить на следующие вопросы:

1. Что такое спонтанное излучение?
2. Что такое вынужденное излучение?
3. Каков принцип работы лазеров?

### **Самостоятельная работа обучающихся**

#### **«Ядерная энергетика. Термоядерный синтез».**

Студенты должны изучить содержание параграфов в учебниках [1] §§216-219, [2] 22.6-22.8. Законспектировать основное содержание параграфов и ответить на следующие вопросы:

1. Что такое цепная ядерная реакция?
2. Как устроен ядерный реактор?
3. Где применяется ядерная энергетика.
4. Что такое термоядерный синтез
5. Как используется термоядерный синтез?

## Список литературы

1. Фирсов, А. В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей [Электронный ресурс]: учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / А. В. Фирсов ; под ред. Т. И. Трофимовой. – Москва: Академия, 2017. – 352 с. – Режим доступа: <http://academia-moscow.ru/reader/?id=227482#copy>. – Загл. с экрана.

2. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля [Электронный ресурс]: учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева. – Москва: Академия, 2017. – 448 с. – Режим доступа: <http://academia-moscow.ru/reader/?id=213496#copy>. – Загл. с экрана.