Министерство высшего и среднего специального образования республики Узбекистан
Ташкентский автомобильно-дорожный институт

Задачник, самоучитель по курсу «Физика»

Оптика

Ташкент – 2011 г.

Министерство высшего и среднего специального образования республики Узбекистан
Ташкентский автомобильно-дорожный институт

«Утверждено»
Научно- методическим
советом ФПО
Пр № от .. 2011г.

Задачник, самоучитель по курсу «Физика»

Оптика

Ташкент – 2011 г.

Задачник, самоучитель по курсу Физика «Оптика» состоит из пяти разделов и предназначен для студентов бакалавров и магистров. Прежде чем решать задачи необходимо ознакомиться с основными формулами и примерами решения задач, которые помещены перед каждым разделом. Большое количество задач представлено с решениями, поэтому задачник дополнительно назван самоучителем. Часть задач составлены с использованием материалов из «Сборника задач по общему курсу физики» В. С. Волькенштейн, 1995 г. изд. «Наука», Москва.

Составители: доц. Мисиров Ш.Ч.

доц. Мирсоатов Р. М.

доц. Бурханов Ш. Д.

ст. Бурханов С.Ш.

Выходные данные:

Формат А5	№ заказа	Тираж 100
Объем	Печ. лист 4,5	2011 М.У. ТАДИ.

ОПТИКА

ЕДИНИЦЫ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

За единицу светового потока принят люмен (лм) — световой поток, испускаемый внутри телесного угла один стерадиан точечным источником света силой одна кандела:

$$1\ \text{лм} = 1\ \text{кд} \cdot 1\ \text{ср}.$$

За единицу освещенности принят люкс (лк) — освещенность площадки один квадратный метр равномерно распределенным световым потоком один люмен:

$$1\ \text{лк} = 1\ \text{лм/м}^2.$$

Единицей светимости источника света является люмен на квадратный метр (лм/м²) — светимость, соответствующая световому потоку один люмен, излучаемому площадкой один квадратный метр.

Единицей яркости служит кандела на квадратный метр (кд/м²) — яркость равномерно светящейся плоской поверхности, дающей в нормальном к ней направлении силу света одна кандела с площадки один квадратный метр.

1. Геометрическая оптика и фотометрия

Для сферического зеркала оптическая сила D определяется формулой

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{2}{R} = \frac{1}{F} = D,$$

где a_1 и a_2 — расстояния предмета и изображения от зеркала, R — радиус кривизны зеркала, F — его фокусное расстояние.

Расстояния, отсчитываемые от зеркала по лучу, считаются положительными, а против луча — отрицательными. Если F выражено в метрах, то D выразится в диоптриях (дптр): 1 дптр $= 1$ м$^{-1}$.

При переходе луча из одной среды в другую имеет место закон преломления света

$$\frac{\sin i}{\sin \beta} = n = \frac{v_1}{v_2},$$

где i — угол падения, β — угол преломления, n — показатель преломления второй среды относительно первой, v_1 и v_2 — скорости распространения света в первой и во второй средах.

Для тонкой линзы, помещенной в однородную среду, оптическая сила D определяется формулой

$$-\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a_2}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)=\frac{1}{F}=D,$$

где a_1 и a_2 — расстояния предмета и изображения от линзы, n — показатель преломлеиия материала линзы, R_1 и R_2 — радиусы кривизны линзы. Правило знаков для линз такое же, как и для зеркал. Оптическая снла двух тонких линз, сложенных вместе,

$$D=D_1+D_2,$$

где D_1 и D_2 — оптические силы лниз.

Поперечное линейное увеличение в зеркалах и линзах определяется формулой

$$k=\frac{y_2}{y_1}=\frac{a_2}{a_1},$$

где y_1 — высота предмета и y_2 — высота изображения.

Увеличение лупы

$$k=\frac{L}{F},$$

где L — расстояние наилучшего зрения и F — фокусное расстояние лупы.

Увеличение мнкроскопа

$$k=LdD_1D_2,$$

где L — расстояние наилучшего зрения, d — расстояние между фокусами объектива и окуляра, D_1 и D_2 — оптические силы объектива и окуляра.

Увеличение телескопа

$$k=\frac{F_1}{F_2},$$

где F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Световой поток Φ определяется энергией, переносимой световыми волнами через данную площадь в единицу времени:

$$\Phi=\frac{dW}{dt}.$$

Сила света I численно равна световому потоку, приходящемуся иа единицу телесного угла:

$$I=\frac{d\Phi}{d\omega},$$

Освещенность E характеризуется световым потоком, приходящимся на единицу площади:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Точечный источник силой света I создает на площадке, отстоящей от него на расстоянии r, освещенность

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\alpha,$$

где α — угол падения лучей.

Светимость R численно равна световому потоку, испускаемому единицей площади светящегося тела:

$$R = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Если светимость тела обусловлена его освещенностью, то

$$R = \rho E,$$

где ρ — коэффициент отражения.

Яркостью B светящейся поверхности называется величина, численно равная отношению силы света с элемента излучающей поверхности к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную к направлению наблюдения (т. е. к видимой поверхности элемента):

$$B = \frac{dI}{dS\cos\theta},$$

где θ — угол между нормалью к элементу поверхности и направлением наблюдения.

Если тело излучает по закону Ламберта, т. е. если яркость не зависит от направления, то светимость R и яркость B связаны соотношением

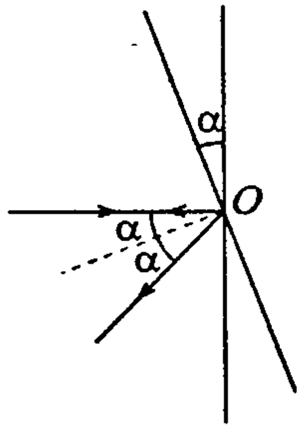
$$R = \pi B.$$

Образцы решения задач.

1.1 Горизонтальный луч света падает на вертикально расположенное зеркало. Зеркало поворачивается на угол α около вертикальной оси. На какой угол θ повернется отраженный луч?

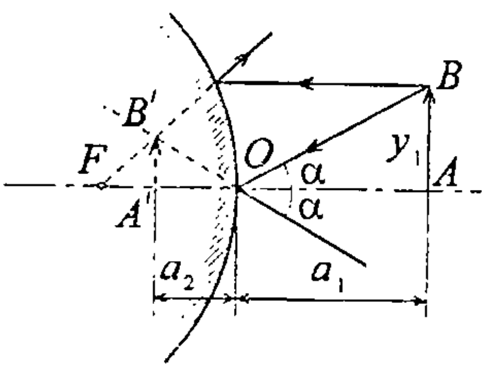
Решение:

При повороте зеркала на угол α перпендикуляр к зеркалу, восстановленный в точке O падения луча, также повернется на угол α, поэтому угол падения тоже будет равен α, а угол между падающим и отраженным лучами равен 2α.



1.2 На каком расстоянии a_2 от зеркала получится изображение предмета в выпуклом зеркале с радиусом кривизны $R = 40$ см, если предмет помещен на расстоянии $a_1 = 30$ см от зеркала? Какова будет высота y_2 изображения, если предмет имеет высоту $y_1 = 2$ см? Проверить вычисления, сделав чертеж на миллиметровой бумаге.

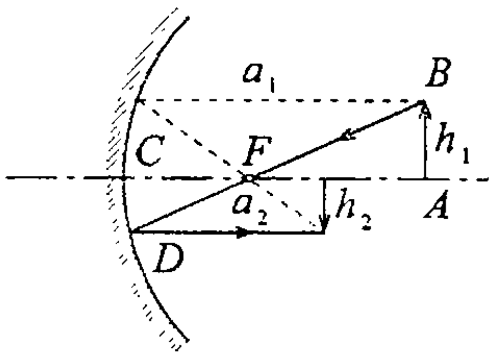
Решение:



Изображение $A'B'$ предмета AB мнимое, прямое, уменьшенное. Фокусное расстояние зеркала $F = -\frac{R}{2} = -20$ см. Используя формулу зеркала, имеем $\frac{1}{a_2} = \frac{1}{F} - \frac{1}{a_1} = -\frac{1}{12}$, откуда $a_2 = -12$ см. Увеличение $k = \frac{|a_2|}{a_1} = 0.4$. Высота изображения $y_2 = ky_1 = 0.8$ см.

1.3 В вогнутом зеркале с радиусом кривизны $R = 40$ см хотят получить действительное изображение, высота которого вдвое меньше высоты самого предмета. Где нужно поставить предмет и где получится изображение?

Решение:



Из подобия треугольников ABF и CDF следует, что $\frac{h_2}{h_1} = \frac{F}{a_1 - F}$ – (1). По формуле вогнутого зеркала имеем $\frac{1}{F} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}$ — (2), откуда $a_2 = \frac{a_1 F}{a_1 - F}$ — (3). Из сравнения соотношений (1) и (2) получаем $\frac{h_1}{h_2} = \frac{a_1}{a_2}$. По условию $\frac{h_1}{h_2} = 2$, следовательно, $\frac{a_1}{a_2} = 2$ или $a_1 = 2a_2$ — (4). Фокусное расстояние зеркала $F = \frac{R}{2} = 20$ см. Из (2) найдем $F = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}$, подставляя (4), получим $F = a_2$, следовательно, $a_1 = 2F = R$. Таким образом, предмет нужно поместить в центр кривизны зеркала, а его изображение получится в фокусе.

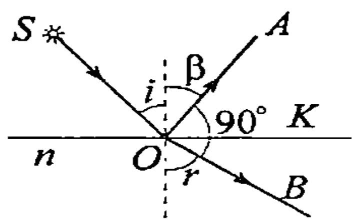
1.4 Высота изображения предмета в вогнутом зеркале вдвое больше высоты самого предмета. Расстояние между предметом и изображением $a_1 + a_2 = 15$ см. Найти фокусное расстояние F и оптическую силу D зеркала.

Решение:

Имеем $\frac{h_2}{h_1} = 2$, следовательно, $\frac{a_2}{a_1} = 2$ (см. задачу 15.5). По условию $a_1 + a_2 = 15$ см. Т. к. $a_2 = 2a_1$, то $a_1 + 2a_1 = 15$ см; $a_1 = 5$ см; $a_2 = 10$ см. Изображение получится прямое, мнимое и увеличенное, если предмет находится между зеркалом и фокусом. Тогда по формуле зеркала $\frac{1}{F} = \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}$, откуда фокусное расстояние $F = \frac{a_1 a_2}{a_2 - a_1} = 10$ см. Оптическая сила зеркала $D = \frac{1}{F} = 10$ дптр.

1.5 Луч света падает под углом i на тело с показателем преломления n. Как должны быть связаны между собой величины i и n, чтобы отраженный луч был перпендикулярен к преломленному?

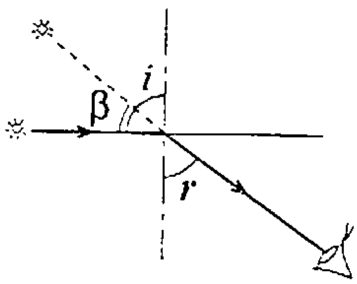
Решение:



Согласно закону преломления $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$ — (1). Из рисунка видно, что $\angle KOB = \beta$, $\angle KOA = r$ (как углы с соответственно перпендикулярными сторонами). Поскольку по закону отражения $\beta = i$, а $\angle KOB + \angle KOA = 90°$ (по условию), то $i + r = 90°$. Совместное решение (1) и (2) дает $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i}{\sin(90° - i)} = \frac{\sin i}{\cos i} = tg i = n$.

1.6 В каком направлении пловец, нырнувший в воду, вид…одящее Солнце?

Решение:



Угол падения солнечных лучей $i = 90°$. Из закона преломления имеем $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ или $\frac{1}{\sin r} = n$, откуда $\sin r = \frac{1}{n} = 0{,}75$; $r \approx 49°$. Следовательно, пловец видит Солнце под углом $\beta = i - r = 41°$ к поверхности воды.

1.7 На стакан, наполненный водой, положена стеклянная пла…а. Под каким углом i должен падать на пластинку луч света, чтобы от поверхности раздела вода — стекло произошло полное внутреннее отражение? Показатель преломления стекла $n = 1{,}5$.

Решение:

По закону преломления $\frac{\sin i}{\sin \beta} = n$. Если $\sin \beta = \frac{n_1}{n}$, где n_1 — показатель преломления воды, то произойдет полное внутреннее отражение от поверхности раздела стекло — вода. Тогда $\sin i = n \sin \beta = n_1 = 1{,}33$, т. е. условия задачи неосуществимы.

1.8 Показатели преломления некоторого сорта стекла для красного и фиолетового лучей равны $n_{кр} = 1{,}51$ и $n_{ф} = 1{,}53$. Найти предельные углы полного внутреннего отражения $\beta_{кр}$ и $\beta_{ф}$ при падении этих лучей на поверхность раздела стекло — воздух.

Решение:

Имеем $\sin\beta = \frac{1}{n}$ (см. задачу 15.15). Отсюда $\sin\beta_{кр} = \frac{1}{n_{кр}} = 0{,}66$; $\beta_{кр} = 41{,}5°$; $\sin\beta_{ф} = \frac{1}{n_{ф}} = 0{,}65$; $\beta_{ф} = 40{,}8°$.

1.9 Что происходит при падении белого луча под углом $i = 41°$ на поверхность раздела стекло — воздух, если взять стекло предыдущей задачи? (Воспользоваться результатами предыдущей задачи.)

Решение:

Поскольку полное внутреннее отражение происходит при значениях угла падения $i > \beta$ (предельного угла полного отражения), то фиолетовые лучи испытают полное внутреннее отражение, а красные лучи выйдут из стекла в воздух.

1.10 Найти фокусное расстояние F_1 кварцевой линзы для ультрафиолетовой линии спектра ртути ($\lambda_1 = 259$ нм), если фокусное расстояние для желтой линии натрия ($\lambda_2 = 589$ нм) $F_2 = 16$ см. Показатели преломления кварца для этих длин волн равны $n_1 = 1{,}504$ и $n_2 = 1{,}458$.

Решение:

Для линзы, имеющей радиусы кривизны R_1 и R_2, имеем $(n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{F}$ — (1), где n — показатель преломления материала, из которого изготовлена линза. Для желтой линии из (1) имеем $F_2 = \frac{R_1 R_2}{(n_2 - 1)(R_2 - R_1)}$, откуда $\frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} = F_2(n_2 - 1)$ — (2). Поскольку для ультрафиолетовой линии $F_1 = \frac{R_1 R_2}{(n_1 - 1)(R_2 - R_1)}$ — (3), то, подставляя (2) в (3), получим $F_1 = \frac{F_2(n_2 - 1)}{n_1 - 1} = 0{,}145$ м.

1.11 Радиусы кривизны поверхностей двояковыпуклой линзы $R_1 = R_2 = 50$ см. Показатель преломления материала линзы $n = 1{,}5$. Найти оптическую силу D линзы.

Решение:

Согласно формуле тонкой линзы $D = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$. Поскольку по условию $R_1 = R_2 = R$, то $D = \frac{2(n-1)}{R}$. Подставляя числовые данные, получим $D = \frac{2(1{,}5 - 1)}{0{,}5} = 2$ дптр.

1.12 Доказать, что в двояковыпуклой линзе с равными радиусами кривизны поверхностей и с показателем преломления $n = 1{,}5$ фокусы совпадают с центрами кривизны.

Решение:

По формуле тонкой линзы $\frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$, откуда при $R_1 = R_2 = R$, имеем $F = \frac{R}{2(n-1)}$. При $n = 1.5$ получим $F = \frac{R}{2(1{,}5-1)} = R$.

1.13 На расстоянии $a_1 = 40$ см от линзы предыдущей задачи на оптической оси находится светящаяся точка. Найти положение изображения этой точки, если она испускает монохроматический свет с длиной волны: а) $\lambda_1 = 760$ нм; б) $\lambda_2 = 430$.

Решение:

Из формулы линзы имеем $a_2 = \frac{Fa_1}{a_1 - F}$ — (1). В задаче 15.43 мы нашли, что для данной линзы длине волны $\lambda_1 = 760$ нм соответствует фокусное расстояние $F_1 = 0{,}08$ м, а длине волны $\lambda_2 = 430$ нм соответствует фокусное расстояние $F_2 = 0{,}05$ м. Подставляя числовые данные в (1), получим: а) $a_2 = 0{,}1$ м; б) $a_2 = 0{,}057$ м.

1.14 Найти увеличение k, даваемое лупой с фокусным расстоянием $F = 2$ см, для: а) нормального глаза с расстоянием наилучшего зрения $L = 25$ см; б) близорукого глаза с расстоянием наилучшего зрения $L = 15$ см.

Решение:

Увеличение лупы $k = \frac{L}{F}$. Подставляя числовые данные, получим: а) $k = \frac{0{,}25}{0{,}02} = 12{,}5$; б) $k = \frac{0{,}15}{0{,}02} = 7{,}5$.

1.15 Какими должны быть радиусы кривизны $R_1 = R_2$ поверхностей лупы, чтобы она давала увеличение для нормального глаза $k = 10$? Показатель преломления стекла, из которого сделана лупа, $n = 1{,}5$.

Решение:

Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения $L = 0{,}25$ м — (1). Фокусное расстояние лупы $F = \frac{R}{2(n-1)}$ (см. задачу 15.36), откуда $R = 2F(n-1)$ — (2). Увеличение лупы $k = \frac{L}{F}$, откуда $F = \frac{L}{k}$ — (3). Подставляя (3) в (2) и с учетом (1), получим $R = \frac{2L(n-1)}{k} = 0{,}025$ м.

1.16 Картину площадью $S = 2 \times 2\,\text{м}^2$ снимают фотоаппаратом, установленным от нее на расстоянии $a = 4{,}5\,\text{м}$. Изображение получилось размером $s = 5 \times 5\,\text{см}^2$. Найти фокусное расстояние F объектива аппарата. Расстояние от картины до объектива считать большим по сравнению с фокусным расстоянием.

Решение:

Поперечное увеличение объектива $k = \dfrac{a_2}{a_1} = \dfrac{\sqrt{s}}{\sqrt{S}} = \dfrac{1}{40}$, отсюда $a_2 = \dfrac{a_1}{40}$ — (1). По формуле линзы $\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{1}{a_2} = \dfrac{1}{F}$, откуда $F = \dfrac{a_1 a_2}{a_1 - a_2}$ — (2). Подставляя (1) в (2), получим $F = \dfrac{a_1}{39} = 0{,}115\,\text{м}$.

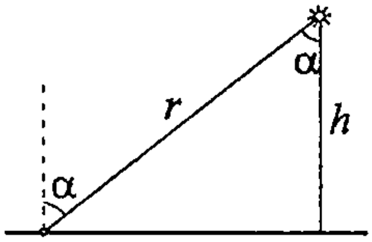
1.17 При помощи двояковыпуклой линзы, имеющей диаметр $D = 9\,\text{см}$ и фокусное расстояние $F = 50\,\text{см}$, изображение Солнца проектируется на экран. Каким получается диаметр d изображения Солнца, если угловой диаметр Солнца $\alpha = 32'$? Во сколько раз освещенность, создаваемая изображением Солнца, будет больше освещенности, вызываемой Солнцем непосредственно?

Решение:

Диаметр изображения $d = 2F\operatorname{tg}\dfrac{\alpha}{2} = 4{,}6 \cdot 10^{-3}\,\text{м}$. Поток лучей, попадающих на поверхность линзы площадью $\dfrac{\pi D^2}{4}$, концентрируется в изображении Солнца площадью $\dfrac{\pi d^2}{4}$. Тогда $\dfrac{E_2}{E_1} = \dfrac{4\pi D^2}{4\pi d^2} = 383$.

1.18 Свет от электрической лампочки с силой света $I =$ падает под углом $\alpha = 45°$ на рабочее место, создавая освещенность $E = 141$ лк. На каком расстоянии r от рабочего места находится лампочка? Над какой высоте h от рабочего места она висит?

Решение:



Освещенность, создаваемая лампочкой, равна $E = \frac{I}{r^2} \cos\alpha$, отсюда $r = \sqrt{\frac{I \cos\alpha}{E}} = 1$ м. Высота $h = r\cos\alpha =$ $= 0{,}7$ м.

1.19 Спираль электрической лампочки с силой света $I =$ заключена в матовую сферическую колбу диаметром: а) $d = 5$ см; б) $d = 10$ см. Найти светимость R и яркость B лампы. Потерей света в оболочке колбы пренебречь.

Решение:

Если потерь света в оболочке колбы не происходит, то светимость R численно равна освещенности E, т. е. $R = E = \frac{4I}{d^2}$ — (1). Светимость R и яркость B связаны соотношением $R = \pi B$, откуда $B = \frac{R}{\pi}$ — (2). Подставляя числовые данные, получим: а) $R = 16 \cdot 10^4$ лм/м^2; $B = 5{,}1 \times$ $\times 10^4$ кд/м^2; б) $R = 4 \cdot 10^4$ лм/м^2; $B = 1{,}27 \cdot 10^4$ кд/м^2.

1.20

15.65. Какую освещенность E дает лампа предыдущей задачи на расстоянии $r = 5$ м при нормальном падении света?

Решение:

По определению $E = \dfrac{I}{r^2}$. Таким образом, освещенность будет одинакова и для прозрачной и для матовой колбы. Подставляя числовые данные, получим $E = 3{,}4$ лк.

1.21

15.66. На лист белой бумаги площадью $S = 20 \times 30\,\text{см}^2$ перпендикулярно к поверхности падает световой поток $\Phi = 120$ лм. Найти освещенность E, светимость R и яркость B бумажного листа, если коэффициент отражения $\rho = 0{,}75$.

Решение:

Имеем $E = \dfrac{\Phi}{S} = 2 \cdot 10^3$ лк. Поскольку светимость листа обусловлена его освещенностью, то $R = \rho E = 1{,}5 \cdot 10^3$ лм/м^2. Светимость R и яркость B связаны соотношением $R = \pi B$, откуда $B = \dfrac{R}{\pi} = 480$ кд/м^2.

1.22 Какова должна быть освещенность E листа бумаги в предыдущей задаче, чтобы его яркость была равна $B = 10^4$ кд/м^2?

Решение:

Имеем $B = \dfrac{R}{\pi}$ — (1); $R = \rho E$ — (2). Подставив (2) в (1), получим $B = \dfrac{\rho E}{\pi}$, откуда $E = \dfrac{\pi B}{\rho} = 4{,}2 \cdot 10^4$ лк.

1.1. Задачи для самостоятельного решения.

1.1.1. Радиус кривизны вогнутого зеркала $R=20$ см. На расстоянии $a_1=30$ см от зеркала поставлен предмет высотой $y_1=1$ см. Найти положение и высоту y_2 изображения. Дать чертеж.

1.1.2. Выпуклое зеркало имеет радиус кривизны $R=60$ см. На расстоянии $a_1=10$ см от зеркала поставлен предмет высотой $y_1=2$ см. Найти положение и высоту y_2 изображения. Дать чертеж.

1.1.3. Перед вогнутым зеркалом на главной оптической оси перпендикулярно к ней на расстоянии $a_1=4F/3$ от зеркала поставлена горящая свеча. Изображение свечи в вогнутом зеркале попадает на выпуклое зеркало с фокусным расстоянием $F'=2F$. Расстояние между зеркалами $d=3F$, их оси совпадают. Изображение свечи в первом зеркале играет роль мнимого предмета по отношению ко второму зеркалу и дает действительное изображение, расположенное между обоими зеркалами. Построить это изображение и найти общее линейное увеличение k системы.

1.1.4. Где будет находиться и какой размер y_2 будет иметь изображение Солнца, получаемое в рефлекторе, радиус кривизны которого $R=16$ м?

1.1.5. Имеется вогнутое зеркало с фокусным расстоянием $F=20$ см. На каком наибольшем расстоянии h от главной оптической оси должен находиться предмет, чтобы продольная сферическая аберрация x составляла не больше 2% фокусного расстояния F?

1.1.6. Луч света падает под углом $i=30°$ на плоскопараллельную стеклянную пластинку и выходит из нее параллельно первоначальному лучу. Показатель преломления стекла $n=1{,}5$. Какова толщина d пластинки, если расстояние между лучами $l=1{,}94$ см?

1.1.7. На плоскопараллельную стеклянную пластинку толщиной $d=1$ см падает луч света под углом $i=60°$. Показатель преломления стекла $n=1{,}73$. Часть света отражается, а часть, преломляясь, проходит в стекло, отражается от нижней поверхности пластинки и, преломляясь вторично, выходит обратно в воздух параллельно первому отраженному лучу. Найти расстояние l между лучами.

1.1.8. Монохроматический луч падает нормально на боковую поверхность призмы, преломляющий угол которой $\gamma=40°$. Показатель преломления материала призмы для этого луча $n=1,5$. Найти угол отклонения δ луча, выходящего из призмы, от первоначального направления.

1.1.9. Монохроматический луч падает нормально на боковую поверхность призмы и выходит из нее отклоненным на угол $\delta=25°$. Показатель преломления материала призмы для этого луча $n=1,7$. Найти преломляющий угол γ призмы.

1.1.10 Преломляющий угол равнобедренной призмы $\gamma=10°$. Монохроматический луч падает на боковую грань под углом $i=10°$. Показатель преломления материала призмы для этого луча $n=1,6$. Найти угол отклонения δ луча от первоначального направления.

1.1.11 Преломляющий угол призмы $\gamma=45°$. Показатель преломления материала призмы для некоторого монохроматического луча $n=1,6$. Каков должен быть наибольший угол падения i этого луча на призму, чтобы при выходе луча из нее не наступило полное внутреннее отражение?

1.1.12. Пучок света скользит вдоль боковой грани равнобедренной призмы. При каком предельном преломляющем угле γ призмы преломленные лучи претерпят полное внутреннее отражение на второй боковой грани? Показатель преломления материала призмы для этих лучей $n=1,6$.

1.1.13. Монохроматический луч падает на боковую поверхность прямоугольной равнобедренной призмы. Войдя в призму, луч претерпевает полное внутреннее отражение от основания призмы и выходит через вторую боковую поверхность призмы. Каким должен быть наименьший угол падения i луча на призму, чтобы еще происходило полное внутреннее отражение? Показатель преломления материала призмы для этого луча $n=1,5$.

1.1.14. Монохроматический луч падает на боковую поверхность равнобедренной призмы и после преломления идет в призме параллельно ее основанию. Выйдя из призмы, он оказывается отклоненным на угол δ от своего первоначального направления. Найти связь между преломляющим углом призмы γ, углом отклонения луча δ и показателем преломления для этого луча n.

1.1.15. Луч белого света падает на боковую поверхность равнобедренной призмы под таким углом, что красный луч выходит из нее перпендикулярно к второй грани. Найти углы отклонения $\delta_{кр}$ и $\delta_ф$ красного и фиолетового лучей от первоначального направления, если преломляющий угол призмы $\gamma=45°$. Показатели преломления материала призмы для красного и фиолетового лучей равны $n_{кр}=1,37$ и $n_ф=1,42$.

1.1.16. Линза с фокусным расстоянием $F=16$ см дает резкое изображение предмета при двух положениях, расстояние между которыми $d=6$ см. Найти расстояние a_1+ $+a_2$ от предмета до экрана.

1.1.17. Двояковыпуклая линза с радиусами кривизны поверхностей $R_1=R_2=12$ см поставлена на таком расстоянии от предмета, что изображение на экране получилось в k раз больше предмета. Найти расстояние a_1+a_2 от предмета до экрана, если: а) $k=1$; б) $k=20$; в) $k=0,2$. Показатель преломления материала линзы $n=1,5$.

1.1.18. Линза предыдущей задачи погружена в воду. Найти ее фокусное расстояние F.

1.1.19. Решить предыдущую задачу при условии, что линза погружена в сероуглерод.

1.1.20. Найти фокусное расстояние F_2 линзы, погруженной в воду, если ее фокусное расстояние в воздухе $F_1=$ $=20$ см. Показатель преломления материала линзы $n=1,6$.

1.1.21. Плоско-выпуклая линза с радиусом кривизны $R=30$ см и показателем преломления $n=1,5$ дает изображение предмета с увеличением $k=2$. Найти расстояния a_1 и a_2 предмета и изображения от линзы. Дать чертеж.

1.1.22 Найти продольную хроматическую аберрацию двояковыпуклой линзы из флинтгласа с радиусами кривизны $R_1=R_2=8$ см. Показатели преломления флинтгласа для красного ($\lambda_{кр}=760$ нм) и фиолетового ($\lambda_ф=430$ нм) лучей равны $n_{кр}=1,5$ и $n_ф=1,8$.

1.1.23 Зрительная труба с фокусным расстоянием $F=50$ см установлена на бесконечность. После того как окуляр трубы передвинули на некоторое расстояние, стали ясно видны предметы, удаленные от объектива на расстояние $a=50$ м. На какое расстояние d передвинули окуляр при наводке?

1.1.24 Микроскоп состоит из объектива с фокусным расстоянием $F_1=2$ мм и окуляра с фокусным расстоянием $F_2=40$ мм. Расстояние между фокусами объектива и окуляра $d=18$ см. Найти увеличение k, даваемое микроскопом.

1.1.25 В центре круглого стола диаметром $D=1{,}2$ м стоит настольная лампа из одной электрической лампочки, расположенной на высоте $h_1=40$ см от поверхности стола. Над центром стола на высоте $h_2=2$ м от его поверхности висит люстра из четырех таких же лампочек. В каком случае получится бо́льшая освещенность на краю стола (и во сколько раз): когда горит настольная лампа или когда горит люстра?

1.1.26 Предмет при фотографировании освещается электрической лампой, расположенной от него на расстоянии $r_1=2$ м. Во сколько раз надо увеличить время экспозиции, если эту же лампу отодвинуть на расстояние $r_2=3$ м от предмета?

1.1.27 Найти освещенность E на поверхности Земли, вызываемую нормально падающими солнечными лучами. Яркость Солнца $B=1{,}2\cdot 10^9$ кд/м².

Ответы на задачи раздела 1.1.

1.1.1. $a_2=-15$ см, $y_2=5$ мм; изображение действительное, обратное и уменьшенное.

1.1.2. $a_2=7{,}5$ см, $y_2=-1{,}5$ см; изображение мнимое, прямое и уменьшенное.

1.1.3. $k=6$.

1.1.4. $a_2=R/2$ — изображение будет находиться в фокусе зеркала; $y_2=7{,}5$ см.

1.1.5. $h=8$ см.

1.1.6. $d=0{,}1$ м.

1.1.7. $l=5{,}8$ мм.

1.1.8. $\delta=34°37'$.

1.1.9. $\gamma=28°$.

1.1.10. $\delta=6°2'$.

1.1.11. $i=10°8'$.

1.1.12. $\gamma=77°22'$.

1.1.13. $i=4°47'$.

1.1.14. $\sin\frac{\delta+\gamma}{2}=n\sin\frac{\gamma}{2}$. В этом случае получается наименьшее отклонение луча от его первоначального направления.

1.1.15. $\delta_{кр}=30°37'$, $\delta_ф=33°27'$.

1.1.16. $a_1+a_2=1$ м.

1.1.17. а) $a_1+a_2=0{,}48$ м; б) $a_1+a_2=2{,}65$ м; в) $a_1+a_2=0{,}864$ м.

1.1.18. $F=0{,}47$ м.

1.1.19. $F=-0{,}75$ м — линза будет рассеивающей.

1.1.20 $F_2=0{,}59$ м.

1.1.21. $a_1=-90$ см; $a_2=180$ см.

1.1.22 $F_{кр}-F_ф=3$ см.

1.1.23 Когда горит настольная лампа, освещенность края стола получается больше в 1,2 раза.

1.1.24 В 2,25 раза.

1.1.25 $E\approx 8\cdot 10^4$ лк.

1.1.26 $d=5$ мм.

1.1.27 $k=562$.

2. Волновая оптика

По принципу Доплера частота ν' света, воспринимаемая регистрирующим прибором, связана с частотой ν, посылаемой источником света, соотношением

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}},$$

где v — скорость регистрирующего прибора относительно источника, c — скорость распространения света. Положительное значение v соответствует удалению источника света. При $v \ll c$ формулу приближенно можно представить в виде

$$\nu' \approx \nu \frac{1}{1 + v/c} = \frac{\nu c}{c + v}.$$

Расстояние между интерференционными полосами на экране, расположенном параллельно двум когерентным источникам света,

$$l = \frac{L}{d} \lambda,$$

где λ — длина волны света, L — расстояние от экрана до источников света, отстоящих друг от друга на расстоянии d (при этом $L \gg d$).

Результат интерференции света в плоскопараллельных пластинках (в проходящем свете) определяется формулами:
усиление света

$$2hn \cos \beta = 2k \frac{\lambda}{2} \qquad (k = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots),$$

ослабление света

$$2hn \cos \beta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \qquad (k = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots),$$

где h — толщина пластинки, n — показатель преломления, β — угол преломления, λ — длина волны света. В отраженном свете условия усиления и ослабления света обратны условиям в проходящем свете.

Радиусы светлых колец Ньютона (в проходящем свете) определяются формулой

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \qquad (k = 1,\ 2,\ \ldots);$$

радиусы темных колец

$$r_k = \sqrt{(2k - 1) R \frac{\lambda}{2}} \qquad (k = 1,\ 2,\ \ldots),$$

где R — радиус кривизны линзы. В отраженном свете расположение светлых и темных колец обратно их расположению в проходящем свете.

Положение минимумов освещенности при дифракции от щели, на которую нормально падает пучок параллельных лучей, определяется условием

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda \qquad (k=1,\ 2,\ 3,\ \ldots),$$

где a — ширина щели, φ — угол дифракции, λ — длина волны падающего света.

В дифракционной решетке максимумы света наблюдаются в направлениях, составляющих с нормалью к решетке угол φ, удовлетворяющий соотношению (при условии, что свет падает на решетку нормально)

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda \qquad (k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots),$$

где d — постоянная решетки, φ — угол дифракции, λ — длина волны падающего света и k — порядок спектра. Постоянная решетки $d=1/N_0$, где N_0 — число щелей решетки, приходящееся на единицу длины решетки.

Разрешающая способность дифракционной решетки определяется формулой

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda}=kN,$$

где N — общее число щелей решетки, k — порядок спектра, λ и $\lambda+\Delta\lambda$ — длины волн двух близких спектральных линий, еще разрешаемых решеткой.

Угловой дисперсией дифракционной решетки называется величина

$$\frac{d\varphi}{d\lambda}.$$

Линейной дисперсией дифракционной решетки называется величина

$$D=F\frac{d\varphi}{d\lambda},$$

где F — фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран.

При отражении естественного света от диэлектрического зеркала имеют место формулы Френеля

$$I_{\perp}=0{,}5 I_0\left[\frac{\sin(i-\beta)}{\sin(i+\beta)}\right]^2, \qquad I_{\parallel}=0{,}5 I_0\left[\frac{\operatorname{tg}(i-\beta)}{\operatorname{tg}(i+\beta)}\right]^2,$$

где $I_{\perp}$ — интенсивность световых колебаний в отраженном луче, совершающихся в направлении, перпендикулярном к плоскости падения света, $I_{\parallel}$ — интенсивность световых колебаний в отраженном луче, совершающихся в направлении, параллельном плоскости падения света, I_0 — интенсивность падающего естественного света, i — угол падения, β — угол преломления.

Если $i+\beta=90°$, то $I_{\parallel}=0$. В этом случае угол падения $i_Б$ и показатель преломления n диэлектрического зеркала связаны соотношением

$$\operatorname{tg} i_Б = n \quad \text{(закон Брюстера)}.$$

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор,

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad \text{(закон Малюса)},$$

где φ — угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, I_0 — интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

Образцы решения задач.

2.1 При фотографировании спектра Солнца было найдено, что желтая спектральная линия ($\lambda = 589$ нм) в спектрах, полученных от левого и правого краев Солнца, была смещена на $\Delta\lambda = 0{,}008$ нм. Найти скорость v вращения солнечного диска.

Решение:

Согласно принципу Доплера при фотографировании левого края Солнца, т. е. когда источник света движется к нам, $\nu' = \dfrac{\nu c}{c - v}$ — (1); при фотографировании правого края диска, когда источник света движется от нас, $\nu'' = \dfrac{\nu c}{c + v}$ — (2). Частота излучения $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$ — (3). Подставляя (3) в (1) и (2), получим $\Delta\lambda = \dfrac{2v\lambda}{c}$, отсюда $v = \dfrac{c\Delta\lambda}{2\lambda} = 2 \cdot 10^3$ м/с.

16.2 Какая разность потенциалов U была приложена между электродами гелиевой разрядной трубки, если при наблюдении вдоль пучка α-частиц максимальное доплеровское смещение линии гелия ($\lambda = 492{,}2$ нм) получилось равным $\Delta\lambda = 0{,}8$ нм?

Решение:

За счет работы сил электрического поля α-частицы приобрели кинстическую энергию, т. е. $qU = \dfrac{mv^2}{2}$, где скорость частиц $v = \dfrac{c\Delta\lambda}{\lambda}$, т. е. $qU = \dfrac{mc^2(\Delta\lambda)^2}{2\lambda^2}$, откуда

$U = \dfrac{mc^2(\Delta\lambda)^2}{2\lambda^2 q}$. Подставляя числовые данные, получим $U = 2500$ В.

16.3. При фотографировании спектра звезды Андромеды бы 2.3 йдено, что линия титана ($\lambda = 495{,}4$ нм) смещена к фиолетовому концу спектра на $\Delta\lambda = 0{,}17$ нм. Как движется звезда относительно Земли?

Решение:

Смещение спектральных линий в сторону коротких волн означает, что звезда приближается к нам. Радиальная скорость ее движения (т. е. скорость вдоль линии, соединяющей звезду и Землю) находится из соотношения $v = \dfrac{c\Delta\lambda}{\lambda} = 103 \cdot 10^3$ м/с.

16.5. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом ($\lambda = 600$ нм). Расстояние между отверстиями d = 2.4 расстояние от отверстий до экрана $L = 3$ м. Найти пол 2.4 ие трех первых светлых полос.

Решение:

Первая светлая полоса находится на расстоянии $y_1 = \dfrac{L}{d}\lambda = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ м. Вторая — на расстоянии $y_2 = 2y_1 = 3{,}6 \cdot 10^{-3}$ м. Третья — на расстоянии $y_3 = 3y_1 = 5{,}4 \cdot 10^{-3}$ м.

16.6. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света $d = 0{,}5$ мм, расстояние до эк 2.5 $L = 5$ м. В зеленом свете получились интерференционные по 2.5 расположенные на расстоянии $l = 5$ мм друг от друга. Найти длину волны λ зеленого света.

Решение:

Имеем $l = \dfrac{L}{d}\lambda$, откуда $\lambda = \dfrac{ld}{L} = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ м.

2.6 Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы $R = 8{,}6$. Наблюдение ведется в отраженном свете. Измерениями установлено, что радиус четвертого темного кольца (считая центральное темное пятно за нулевое) r_4 = 4,5 мм. Найти длину волны λ падающего света.

Решение:

Имеем $\lambda = \dfrac{r_k^2}{kR}$ (см. задачу 16.13). Подставляя числовые данные, получим $\lambda = 589 \cdot 10^{-9}$ м.

2.7 Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы $R = 15$ м. Наблюдение ведется в отраженном свете. Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона $l = 9$ мм. Найти длину волны λ монохроматического света.

Решение:

Радиус k-го светлого кольца в отраженном свете определяется соотношением $r_k = \sqrt{(2k-1)R\dfrac{\lambda}{2}}$. Тогда $l = r_{25} - r_5 = \sqrt{49R\dfrac{\lambda}{2}} - \sqrt{9R\dfrac{\lambda}{2}}$; $l = 4\sqrt{R\dfrac{\lambda}{2}}$. Отсюда $\lambda = \dfrac{l^2}{8R} = 675 \cdot 10^{-9}$ м.

2.8 Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 600$ нм, падающим по нормали к поверхности пластинки. Найти толщину h воздушного слоя между линзой и стеклянной пластинкой в том месте, где наблюдается четвертое темное кольцо в отраженном свете.

Решение:

Условие минимума в отраженном свете: $2hn = k\lambda$. По условию $k = 4$, $n = 1$, тогда $2h = 4\lambda$, откуда $h = 2\lambda =$ $= 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ м.

2.9 Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 500$ нм, падающим по нормали к поверхности пластинки. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено водой. Найти толщину h слоя воды между линзой и пластинкой в том месте, где наблюдается третье светлое кольцо в отраженном свете.

Решение:

Условие максимума в отраженном свете $2hn = (2k + 1)\dfrac{\lambda}{2}$.

По условию $k = 3$, $n = 1{,}33$, тогда $2hn = \dfrac{7\lambda}{2}$, откуда

$$h = \frac{7\lambda}{4n} = 658 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

2.10 В опыте с интерферометром Майкельсона для смещения интерференционной картины на $k = 500$ полос потребовалось переместить зеркало на расстояние $L = 0{,}161$ мм. Найти длину волны λ падающего света.

Решение:

Перемещение зеркала на расстояние $\frac{\lambda}{2}$ соответствует изменению разности хода на λ, т. е. смещению интерференционной картины на одну полосу. Таким образом, $L = \frac{k\lambda}{2}$, откуда $\lambda = \frac{2L}{k} = 644 \cdot 10^{-9}$ м.

2.11 Пучок белого света падает по нормали к поверхности стеклянной пластинки толщиной $d = 0{,}4$ мкм. Показатель преломления стекла $n = 1{,}5$. Какие длины волн λ, лежащие в пределах видимого спектра (от 400 до 700 нм), усиливаются в отраженном свете?

Решение:

Условие максимума в отраженном свете $2dn = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

Отсюда $\lambda = \frac{4dn}{2k+1}$. При $k = 1$ получаем $\lambda = 800$ нм, данная волна не лежит в пределах видимого спектра. При $k = 2$ получим $\lambda = 480$ нм, что удовлетворяет условию. При $k = 3$ получим $\lambda = 343$ нм, эта длина волны также не лежит в пределах видимого спектра. Таким образом, искомая длина волны $\lambda = 480$ нм.

2.12 На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки. Какова должна быть постоянная d дифракционной решетки, чтобы в направлении $\varphi = 41^\circ$ совпадали максимумы линий $\lambda_1 = 656.3$ нм и $\lambda_2 = 410.2$ нм?

Решение:

Имеем $sin\varphi = \frac{k_1\lambda_1}{d} = \frac{k_2\lambda_2}{d}$, следовательно, $k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$. Отсюда $\frac{k_2}{k_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1.6$ — (1). Поскольку числа k_1 и k_2 должны быть целыми, то из условия (1) найдем $k_1 = 5$ и $k_2 = 8$. Тогда $d = \frac{k_1\lambda_1}{sin\varphi} = 5\cdot10^{-6}$ м.

2.13 **16.42** На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию λ_2 в спектре третьего порядка накладывается красная линия гелия ($\lambda_1 = 670$ нм) спектра второго порядка?

Решение:

Имеем $d\,sin\varphi = 2\lambda_1$; $d\,sin\varphi = 3\lambda_2$. Отсюда $\lambda_2 = \frac{2}{3}\lambda_1 =$ $= 447$ нм — синяя линия спектра гелия.

2.14 Найти наибольший порядок k спектра для желтой линии натрия ($\lambda = 589$ нм), если постоянная дифракционной решетки $d = 2$ мкм.

Решение:

Из формулы дифракционной решетки найдем $k = \dfrac{d\,sin\,\varphi}{\lambda}$.

Поскольку $sin\,\varphi \le 1$, то $k \le \dfrac{d}{\lambda} = 3{,}4$, т. е. $k_{max} = 3$.

2.15 На дифракционную решетку нормально падает пучок монохроматического света. Максимум третьего порядка наблюдается под углом $\varphi = 36°48'$ к нормали. Найти постоянную d решетки, выраженную в длинах волн падающего света.

Решение:

По формуле дифракционной решетки $d\,sin\,\varphi = 3\lambda$, откуда $\dfrac{d}{\lambda} = \dfrac{3}{sin\,\varphi} = 5$, т. е. $d = 5\lambda$.

2.16 Какова должна быть постоянная d дифракционной решетки, чтобы в первом порядке был разрешен дублет натрия $\lambda_1 = 589$ нм и $\lambda_2 = 589{,}6$ нм? Ширина решетки $a = 2{,}5$ см.

Решение:

Имеем $d = \frac{a(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1}$ (см. задачу 16.48). Подставляя числовые данные, получим $d = 25{,}5 \cdot 10^{-6}$ м.

2.17 Постоянная дифракционной решетки $d = 2$ мкм. Какую разность длин волн $\Delta\lambda$ может разрешить эта решетка в области желтых лучей ($\lambda = 600$ нм) в спектре второго порядка? Ширина решетки $a = 2{,}5$ см.

Решение:

Имеем $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k\frac{a}{d}$ (см. задачу 16.48), откуда $\Delta\lambda = \frac{\lambda d}{ka} = 24 \cdot 10^{-12}$ м.

2.18 Постоянная дифракционной решетки $d = 2{,}5$ мкм. Найти угловую дисперсию $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ решетки для $\lambda = 589$ нм в спектре первого порядка.

Решение:

Имеем $d\sin\varphi = k\lambda$. Дифференцируя, получим $d\cos\varphi d\varphi = kd\lambda$ или $\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos\varphi}$. Подставляя числовые данные, получим $\sin\varphi = 0{,}236$, откуда $\varphi \approx 13{,}5°$. Тогда $\cos\varphi = 0{,}972$ и $\frac{d\varphi}{d\lambda} = 4{,}1 \cdot 10^5$ рад/м.

2.1 Задачи для самостоятельного решения.

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

2.2. В опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей помещалась тонкая стеклянная пластинка, вследствие чего центральная светлая полоса смещалась в положение, первоначально занятое пятой светлой полосой (не считая центральной). Луч падает перпендикулярно к поверхности пластинки. Показатель преломления пластинки $n=1,5$. Длина волны $\lambda=600$ нм. Какова толщина h пластинки?

2.3. В опыте Юнга стеклянная пластинка толщиной $h=12$ см помещается на пути одного из интерферирующих лучей перпендикулярно к лучу. На сколько могут отличаться друг от друга показатели преломления в различных местах пластинки, чтобы изменение разности хода от этой неоднородности не превышало $\Delta=1$ мкм?

2.4. На мыльную пленку падает белый свет под углом $i=45°$ к поверхности планки. При какой наименьшей толщине h пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет ($\lambda=600$ нм)? Показатель преломления мыльной воды $n=1,33$.

2.5. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин вследствие стекания жидкости. При наблюдении интерференционных полос в отраженном свете ртутной дуги ($\lambda=546,1$ нм) оказалось, что расстояние между пятью полосами $l=2$ см. Найти угол γ клина. Свет падает перпендикулярно к поверхности пленки. Показатель преломления мыльной воды $n=1,33$.

2.6. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин вследствие стекания жидкости. Интерференция наблюдается в отраженном свете через красное стекло ($\lambda_1=631$ нм). Расстояние между соседними красными полосами при этом $l_1=3$ мм. Затем эта же пленка наблюдается через синее стекло ($\lambda_2=400$ нм). Найти расстояние l_2 между соседними синими полосами. Считать, что за время измерений форма пленки не изменяется и свет падает перпендикулярно к поверхности пленки.

2.7. Пучок света ($\lambda=582$ нм) падает перпендикулярно к поверхности стеклянного клина. Угол клина $\gamma=20''$. Какое число k_0 темных интерференционных полос приходится на единицу длины клина? Показатель преломления стекла $n=1,5$.

2.8. Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы $R=5$ м. Наблюдение ведется в проходящем свете. Найти радиусы r_c и $r_{кр}$ четвертого синего кольца ($\lambda_c=400$ нм) и третьего красного кольца ($\lambda_{кр}=630$ нм).

2.9. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдеиие ведется в отраженном свете. Расстояние между вторым и двадцатым темными кольцами $l_1=4{,}8$ мм. Найти расстояние l_2 между третьим и шестнадцатым темными кольцами Ньютона.

2.10 Установка для получения колец Ньютона освещается светом от ртутной дуги, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдение ведется в проходящем свете. Какое по порядку светлое кольцо, соответствующее линии $\lambda_1=579{,}1$ нм, совпадает со следующим светлым кольцом, соответствующим линии $\lambda_2=577$ нм?

2.11 Установка для получения колец Ньютона освещается светом с длиной волны $\lambda=589$ нм, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы $R=10$ м. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью. Найти показатель преломления n жидкости, если радиус третьего светлого кольца в проходящем свете $r_3=3{,}65$ мм.

2.12 Свет от монохроматического источника ($\lambda=600$ нм) падает нормально на диафрагму с диаметром отверстия $d=6$ мм. За диафрагмой на расстоянии $l=3$ м от нее находится экран. Какое число k зон Френеля укладывается в отверстии диафрагмы? Каким будет центр дифракционной картины на экране: темным или светлым?

2.13 Найти радиусы r_k первых пяти зон Френеля, если расстояние от источника света до волновой поверхности $a=1$ м, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения $b=1$ м. Длина волны света $\lambda=500$ нм.

2.14 Найти радиусы r_k первых пяти зон Френеля для плоской волны, если расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения $b=1$ м. Длина волны света $\lambda=500$ нм.

2.15 Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda=600$ нм). На расстоянии $a=0{,}5l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром $D=1$ см. Найти расстояние l, если преграда закрывает только центральную зону Френеля.

2.16 Дифракционная картина наблюдается на расстоянии $l=4$ м от точечного источника монохроматического света ($\lambda=500$ нм). Посередине между экраном и источником света помещена диафрагма с круглым отверстием. При каком радиусе R отверстия центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным?

2.17 На диафрагму с диаметром отверстия $D=1{,}96$ мм падает нормально параллельный пучок монохроматического света ($\lambda=600$ нм). При каком наибольшем расстоянии l между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины еще будет наблюдаться темное пятно?

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

2.19 На щель шириной $a=20$ мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света ($\lambda=500$ нм). Найти ширину A изображения щели на экраие, удаленном от щели на расстояние $l=1$ м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.

2.20 На щель шириной $a=6\lambda$ падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ. Под каким углом φ будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

2.21 На дифракционную решетку падает нормально пучок света. Для того чтобы увидеть красную линию ($\lambda=700$ нм) в спектре этого порядка, зрительную трубу пришлось установить под углом $\varphi=30°$ к оси коллиматора. Найти постоянную d дифракционной решетки. Какое число штрихов N_0 нанесено на единицу длины этой решетки?

2.22 Угловая дисперсия дифракционной решетки для $\lambda=668$ нм в спектре первого порядка $d\varphi/d\lambda=2{,}02\cdot10^5$ рад/м. Найти период d дифракционной решетки.

2.23 Найти линейную дисперсию D дифракционной решетки в условиях предыдущей задачи, если фокусное расстояние линзы, проектнрующей спектр на экран, равно $F=40$ см.

2.24 На каком расстоянии l друг от друга будут находиться на экране две линии ртутной дуги ($\lambda_1=577$ нм и $\lambda_2=579{,}1$ нм) в спектре первого порядка, полученном при помощи дифракционной решетки? Фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран, $F=0{,}6$ м. Постоянная решетки $d=2$ мкм.

2.25 На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ($\lambda_1=630$ нм) видна в спектре третьего порядка под углом $\varphi=60°$. Какая спектральная линия λ_2 видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? Какое число штрихов N_0 на единицу длины имеет дифракционная решетка? Найти угловую дисперсию $d\varphi/d\lambda$ этой решетки для длины волны $\lambda_1=630$ нм в спектре третьего порядка.

2.26 Для какой длины волны λ дифракционная решетка имеет угловую дисперсию $d\varphi/d\lambda=6{,}3\cdot10^5$ рад/м в спектре третьего порядка? Постоянная решетки $d=5$ мкм.

2.27 Какое фокусное расстояние F должна иметь линза, проектирующая на экран спектр, полученный при помощи дифракционной решетки, чтобы расстояние между двумя линиями калия $\lambda_1=404{,}4$ нм и $\lambda_2=404{,}7$ нм в спектре первого порядка было равным $l=0{,}1$ мм? Постоянная решетки $d=2$ мкм.

2.28 Найти угол $i_Б$ полной поляризации при отражении света от стекла, показатель преломления которого $n=1{,}57$.

2.29 Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества $i=45°$. Найти для этого вещества угол $i_Б$ полной поляризации.

2.30 Под каким углом $i_Б$ к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были наиболее полно поляризованы?

2.31 Найти показатель преломления n стекла, если при отражении от него света отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления $\beta=30°$.

2.32 Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный ($n=1,5$) сосуд, и отражается от дна. Отраженный луч полностью поляризован при падении его на дно сосуда под углом $i_Б=42°37'$. Найти показатель преломления n жидкости. Под каким углом i должен падать на дно сосуда луч света, идущий в этой жидкости, чтобы наступило полное внутреннее отражение?

2.33 Пучок плоскополяризованного света ($\lambda=589$ нм) падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно к его оптической оси. Найти длины волн λ_o и λ_e обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле, если показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и для необыкновенного лучей равны $n_o=1,66$ и $n_e=1,49$.

2.34 Найти коэффициент отражения ρ и степень поляризации P_1 отраженных лучей при падении естественного света на стекло ($n=1,5$) под углом $i=45°$. Какова степень поляризации P_2 преломленных лучей?

Ответы на задачи раздела 2.1

2.1. В 1,3 раза.

2.2. $h=k\lambda/(n-1)=6$ мкм.

2.3. $\Delta n \leqslant 5\cdot10^{-5}$.

2.4. $h=0,13$ мкм.

2.5. $\operatorname{tg}\gamma=k\lambda/2nl=5,13\cdot10^{-5}$ и $\gamma=11''$.

2.6. $l_2=1,9$ мм.

2.7. $k_0=5$ см$^{-1}$.

2.8. $r_c=\sqrt{4R\lambda_c}=2,8$ мм; $r_{кр}=\sqrt{3R\lambda_{кр}}=3,1$ мм.

2.9. $l_2=3,66$ мм.

2.11 $k=275$.

2.12 $n=k\lambda R/r_k^2=1,33$.

2.13 $k=5$; центр дифракционной картины будет светлым.

2.14 Радиус k-й зоны $r_k=\sqrt{kab\lambda/(a+b)}$. Подставляя числовые данные, найдем $r_1=0{,}50$ мм, $r_2=0{,}71$ мм, $r_3=0{,}86$ мм, $r_4=1{,}0$ мм и $r_5=1{,}12$ мм.

2.15 $r_1=0{,}71$ мм; $r_2=1{,}0$ мм; $r_3=1{,}22$ мм; $r_4=1{,}41$ мм; $r_5=1{,}58$ мм.

2.1. $l=167$ м.

2.16 Пусть отверстие диафрагмы пропускает k зон Френеля. Тогда радиус k-й зоны есть одновременно радиус отверстия: $R=$ $=r_k=\sqrt{kab\lambda/(a+b)}$. Наименьшая освещенность центра колец, наблюдаемых на экране, соответствует двум зонам ($k=2$). Подставляя числовые данные, найдем $R=1$ мм.

2.17 $l=0{,}8$ м.

2.18 $\varphi_1=17°8'$; $\varphi_2=36°5'$; $\varphi_3=62°$.

2.19 $A=5$ см.

2.20 $\varphi=30°$.

2.21 $d=2{,}8$ мкм; $N_0=3570$ см$^{-1}$.

2.22 $d=5$ мкм.

2.23 $D=81$ мкм/нм.

2.24 $l=0{,}65$ мм.

2.25 $\lambda_2=475$ нм; $N_0=460$ мм$^{-}$

2.26 $\lambda=510$ нм.

2.27 $F=0{,}65$ м.

2.28 $i_Б=57°30'$.

2.29 $i_Б=54°44'$.

2.30 $i_Б=37°$.

2.31 $n=1{,}73$.

2.32 $n=1{,}63$; $i=66°56'$.

2.33 $\lambda_o=355$ нм, $\lambda_e=395$ нм.

16.68. $\rho=I/I_0=5{,}06\%$; $P_1=83\%$; $P_2=4{,}42\%$.

3. *Элементы теории относительности*

Длина l тела, движущегося со скоростью v относительно некоторой системы отсчета, связана с длиной l_0 тела, неподвижного в этой системе, соотношением

$$l = l_0 \sqrt{1-\beta^2},$$

где $\beta = v/c$, c — скорость распространения света.

Промежуток времени $\Delta\tau$ в системе, движущейся со скоростью v по отношению к наблюдателю, связан с промежутком времени $\Delta\tau_0$ в неподвижной для наблюдателя системе соотношением

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Зависимость массы m тела от скорости v его движения дается уравнением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

где m_0 — масса покоя этого тела.

Зависимость кинетической энергии тела от скорости v его движения дается уравнением

$$W_к = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right).$$

Изменение массы системы на Δm соответствует изменению энергии системы на

$$\Delta W = c^2 \Delta m.$$

Образцы решения задач.

3.1. При какой относительной скорости v движения релятивистское сокращение длины движущегося тела составляет 25%?

Решение:

Имеем $l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ — (1). По условию $\frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \frac{l}{l_0} = 0{,}25$, отсюда $l = 0{,}75 l_0$ — (2). Подставляя (2) в (1), получим $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 0{,}75$; $\quad 1-\frac{v^2}{c^2} = 0.5625$; $\quad v = \sqrt{c^2(1-0{,}5625)} =$
$= 1{,}98\cdot 10^8$ м/с.

3.2. Какую скорость v должно иметь движущееся тело, чтобы предельные размеры уменьшились в 2 раза?

Решение:

Пусть тело движется с постоянной скоростью v относительно инерциальной системы K'. Поскольку в системе K' длина тела $l = l_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$, а по условию задачи $l_0 = 2l$, то $l = 2l\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$. Отсюда $\frac{1}{4} = 1 - \frac{v^2}{c^2}$, следовательно,

$$v = c\sqrt{1-\frac{1}{4}} = 2.6\cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

3.5. Во сколько раз увеличивается продолжительность существования нестабильной частицы по часам неподвижного наблюдателя, если она начинает двигаться со скоростью, составляющей 99% скорости света?

Решение:

Промежуток времени $\Delta\tau$ в системе, движущейся со скоростью v по отношению к наблюдателю, связан с промежутком времени $\Delta\tau_0$ в неподвижной для наблюдателя системе соотношением $\Delta\tau = \dfrac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ — (1), где $\beta = \dfrac{v}{c}$ — (2) — относительная скорость, c — скорость света. По условию $\beta = 99\% = 0{,}99$. Из формулы (1) получаем $\dfrac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0} = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 7{,}08$ раза.

3.4. 3.6. На сколько увеличится масса α-частицы при ускорении его начальной скорости, равной нулю, до скорости, равной 0,9 скорости света?

Решение:

Зависимость массы m тела от скорости его движения дается уравнением $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, где $m_0 = 6{,}6\cdot10^{-27}$ кг — масса покоя α-частицы. По условию $v = 0{,}9\cdot c$, тогда $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-0{,}81c^2/c^2}} = 2{,}3m_0$. Отсюда $\Delta m = 2{,}3m_0 - m_0 = 1{,}3m_0 = 8{,}6\cdot10^{-27}$ кг.

17.8. При какой скорости v масса движущегося электрона вдвое больше его массы покоя?

Решение:

Масса движущегося электрона (см. задачу 17.7) дается уравнением $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ — (1), где $\beta = \frac{v}{c}$ — (2) — относительная скорость. Из (1) имеем $\frac{m_0}{m} = \sqrt{1-\beta^2}$ — (3). Подставляя (2) в (3), получаем $\frac{m_0}{m} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ — (4). По условию $\frac{m_0}{m} = \frac{1}{2}$ — (5). Приравнивая правые части соотношений (4) и (5), получаем $\frac{1}{2} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$, откуда находим искомую скорость электрона $v = \frac{c\sqrt{3}}{2} = 2{,}6 \cdot 10^8$ м/с.

17.9. До какой энергии $W_к$ можно ускорить частицы в циклотроне, если относительное увеличение массы частицы не должно превышать 5%? Задачи решить для: а) электронов; б) протонов; в) дейтонов.

Решение:

Имеем $W_к = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1\right) = c^2\left(\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0\right)$;

$W_к = c^2(m - m_0)$, откуда $\frac{W_к}{m_0} = c^2\frac{m-m_0}{m_0}$ — (1). По условию $\frac{m-m_0}{m_0} = 0{,}05$, тогда из (1) получим $W_к = 0{,}05 m_0 c^2$. Подставляя числовые данные, получим: а) $W_к = 25{,}6 \cdot 10^3$ эВ; б) $W_к = 47 \cdot 10^6$ эВ; в) $W_к = 94 \cdot 10^6$ эВ.

3.7. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти электрон, чтобы его скорость составляла 95% скорости света?

Решение:

Согласно закону сохранения энергии $mc^2 + eU = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ или $eU = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right)$ — (1). Подставляя в (1) значение $v = 0{,}95 \cdot c$, получим $eU = 2{,}2mc^2$, откуда $U = \frac{2{,}2mc^2}{e} = 1{,}1 \cdot 10^6$ В.

3.8. **17.12.** Найти скорость v мезона, если его полная энергия в 10 раз ше энергии покоя.

Решение:

Полная энергия мезона W складывается из его кинетической энергии $W_к$ и энергии покоя W_0. Поскольку $W_к = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$, а $W_0 = m_0c^2$, то $W = W_к + W_0 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$. По условию $\frac{W}{W_0} = 10$, т. е. $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 10$. Отсюда $\beta = \frac{v}{c} = 0{,}995$; $v = \beta c = 2{,}985 \cdot 10^8$ м/с.

3.9. Синхрофазотрон дает пучок протонов с кинетической энергией $W_к = 10$ ГэВ. Какую долю β скорости света составляет скорость протонов в этом пучке?

Решение:

Зависимость кинетической энергии протонов от скорости их движения дается уравнением $W_к = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$.

Отсюда доля скорости протонов от скорости света $\beta = \sqrt{1 - \frac{m_0^2c^4}{\left(W_к + m_0c^2\right)^2}} = 0{,}996 \cdot 100\% = 99{,}6\%$.

3.10 Найти релятивистское сокращение размеров протонов в условиях предыдущей задачи.

Решение:

Диаметр протона d, движущегося со скоростью v относительно некоторой системы отсчета, связан с диаметром протона d_0, неподвижного в этой системе, соотношением $d = d_0\sqrt{1-\beta^2}$ — (1). Из задачи 17.14 доля скорости протонов от скорости света $\beta = 99{,}6\% = 0{,}996$. Релятивистское сокращение размеров протона из формулы (1) равно $\frac{d_0 - d}{d_0} = 1 - \sqrt{1-\beta^2} = 0{,}911 \cdot 100\% = 91{,}1\%$.

3.1. Задачи для самостоятельного решения

3.1.1. Мезоны космических лучей достигают поверхности Земли с самыми разнообразными скоростями. Найти релятивистское сокращение размеров мезона, скорость которого равна 95% скорости света.

3.1.2. Мезон, входящий в состав космических лучей, движется со скоростью, составляющей 95% скорости света. Какой промежуток времени $\Delta\tau$ по часам неподвижного наблюдателя соответствует одной секунде «собственного времени» мезона?

3.1.3. Найти отношение e/m заряда электрона к его массе для скоростей: а) $v \ll c$; б) $v=2\cdot10^8$ м/с; в) $v=2{,}2\cdot10^8$ м/с; г) $v=2{,}4\cdot10^8$ м/с; д) $v=2{,}6\cdot10^8$ м/с; е) $v=2{,}8\cdot10^8$ м/с. Составить таблицу и построить графики зависимостей m и e/m от величины $\beta=v/c$ для указанных скоростей.

3.1.4. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти протон, чтобы его продольные размеры стали меньше в 2 раза?

3.1.5. Какую долю β скорости света должна составлять скорость частицы, чтобы ее кинетическая энергия была равна ее энергии покоя?

3.1.6. Циклотрон дает пучок электронов с кинетической энергией $W_к=0{,}67$ МэВ. Какую долю β скорости света составляет скорость электронов в этом пучке?

3.1.7. Составить для электронов и протонов таблицу зависимости их кинетической энергии $W_к$ от скорости v (в долях скорости света) для значений β, равных: 0,1; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 0,999.

3.1.8. Масса движущегося электрона вдвое больше его массы покоя. Найти кинетическую энергию $W_к$ электрона.

3.1.9. Какому изменению массы Δm соответствует изменение энергии на $\Delta W=4{,}19$ Дж?

3.1.10. Найти изменение энергии ΔW, соответствующее изменению массы на $\Delta m=1$ а. е. м.

3.1.11. Найти изменение энергии ΔW, соответствующее изменению массы $\Delta m=m_e$.

3.1.12. Найти изменение массы Δm_μ, происходящее при образовании $\nu=1$ моль воды, если реакция образования воды такова:

$$2H_2+O_2=2H_2O+5{,}75\cdot10^5 \text{ Дж}.$$

3.1.13. При делении ядра урана $^{235}_{92}U$ освобождается энергия $W=200$ МэВ. Найти изменение массы Δm_μ при делении $\nu=1$ моль урана.

3.1.14. Солнце излучает поток энергии $P=3{,}9\cdot10^{26}$ Вт. За какое время τ масса Солнца уменьшится в 2 раза? Излучение Солнца считать постоянным.

Ответы на задачи раздела 3.1

3.1.1. $(l_0 - l)/l_0 \leqslant 68{,}8\%$.

3.1.2. $\Delta\tau = 3{,}2$ с.

3.1.3. На рис. 109 дан характер зависимости массы m электрона и отношения e/m от величины $\beta = v/c$.

3.1.4. $U = 510$ кВ.

3.1.5. $\beta = 86{,}6\%$.

3.1.6. $\beta = 0{,}9$.

3.1.8. $W_к = 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж.

3.1.9. $\Delta m = 4{,}6 \cdot 10^{-17}$ кг.

3.1.10. $\Delta W = 931$ МэВ.

3.1.11. $\Delta W = 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж.

3.1.12. $\Delta m_{\mu} = 3{,}2 \cdot 10^{-9}$ г/моль. Таким образом, в результате реакции получается не 18 г воды, а на $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ г меньше. Эта величина лежит за пределами чувствительности самых точных весов. Такого же порядка изменение массы и при других химических реакциях. При ядерных реакциях изменение массы уже значительно (см. следующую задачу).

3.1.13 $\Delta m_{\mu} = 0{,}217$ г/моль.

3.1.14 $\tau = 7 \cdot 10^{12}$ лет.

3.1.7. **Составьте Таблицу**

4. *Тепловое излучение*

Энергетическая светимость (излучательность) абсолютно черного тела, т. е. энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности абсолютно черного тела, определяется формулой Стефана — Больцмана

$$R_э = \sigma T^4,$$

где T — термодинамическая температура, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$К^4) — постоянная Стефана — Больцмана.

Если излучаемое тело не является абсолютно черным, то

$$R'_э = k\sigma T^4,$$

где коэффициент k всегда меньше единицы.

Энергетическая светимость $R_э$ связана со спектральной плотностью энергетической светимости абсолютно черного тела r_λ соотношением

$$R_э = \int_0^\infty r_\lambda \, d\lambda.$$

Произведение термодинамической температуры абсолютно черного тела на длину волны, при которой спектральная плотность энергетической светимости этого тела максимальна, равна постоянной величине (первый закон Вина):

$$\lambda_m T = C_1 = 2{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела возрастает пропорционально пятой степени температуры (второй закон Вина):

$$r_{\lambda\,\max} = C_2 T^5, \quad \text{где} \quad C_2 = 1{,}29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К}^5).$$

Образцы решения задач.

4.1. Найти температуру T печи, если известно, что излучение из отверстия в ней площадью $S = 6{,}1\,\text{см}^2$ имеет мощность $N = 34{,}6$ Вт. Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

Решение:

Мощность излучения из отверстия печи определяется соотношением $N = R_э S$ — (1). Поскольку по условию излучение близко к излучению абсолютно черного тела, то по закону Стефана — Больцмана $R_э = \sigma T^4$ — (2), где $\sigma = 5{,}67\cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) — постоянная Стефана — Больцмана. Подставляя (2) в (1), получаем $N = \sigma T^4 S$, откуда температура печи $T = \left(\dfrac{N}{\sigma S}\right)^{\frac{1}{4}} = 1000$ К.

4.2. Какую мощность N излучения имеет Солнце? Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела. Температура поверхности Солнца $T = 5800$ К.

Решение:

Поскольку по условию излучение близко к излучению абсолютно черного тела, то мощность излучения Солнца (см. задачу 18.1) выражается соотношением $N = \sigma T^4 S$ — (1), где $S = 4\pi R_C^2$ — (2) — площадь поверхности Солнца, $R_C = 6{,}96\cdot 10^8$ м — радиус Солнца. Подставляя (2) в (1), получаем $N = 4\pi\sigma T^4 R_C^2 = 3{,}9\cdot 10^{26}$ Вт.

4.3. Какую энергетическую светимость $R'_э$ имеет затвердевший свинец? Отношение энергетических светимостей свинца и абсолютно черного тела для данной температуры $k = 0,6$.

Решение:
Затвердевающий свинец ведет себя как серое тело. По закону Стефана — Больцмана для серого тела $R'_э = k\sigma T^4$, где k — отношение энергетических светимостей абсолютно черного и серого тел при данной температуре, или коэффициент черноты, $T = 600$ К — температура плавления свинца. Подставляя числовые данные, получим $R_э = 4,4$ кВт/м^2.

4.4. Мощность излучения абсолютно черного тела $N = 34$ кВт. Найти температуру T этого тела, если известно, что его поверхность $S = 0,6$ м^2.

Решение:
Мощность излучения абсолютно черного тела (см. задачу 18.1) выражается соотношением $N = \sigma T^4 S = 1000$ К.

4.5. Мощность излучения раскаленной металлической поверхности $N' = 0,67$ кВт. Температура поверхности $T = 2500$ К, ее площадь $S = 10$ см^2. Какую мощность излучения N имела бы эта поверхность, если бы она была абсолютно черной? Найти отношение k энергетических светимостей этой поверхности и абсолютно черного тела при данной температуре.

Решение:
Если бы поверхность была абсолютно черной, то ее мощность излучения (см. задачу 18.1) была равна $N = \sigma T^4 S = 2,22$ кВт. Отношение энергетических светимостей поверхности и абсолютно черного тела при данной температуре равно $k = \dfrac{N'}{N} = 0,3$.

4.6. Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке $d = 0{,}3$ мм, длина спирали $l = 5$ см. При включении лампочки в сеть напряжением U 127 В через лампочку течет ток $I = 0{,}31$ А. Найти температуру T спирали. Считать, что по установлении равновесия все выделяющееся в нити тепло теряется в результате излучения. Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела для данной температуры $k = 0{,}31$.

Решение:

Поскольку вольфрамовая спираль излучает как серое тело, то ее мощность излучения $N' = R'_э S$ — (1), где по закону Стефана — Больцмана $R'_э = k\sigma T^4$ — (2) — энергетическая светимость серого тела, $S = 2\pi dl$ — (3) — площадь поверхности вольфрамовой спирали. Подставляя (2) и (3) в (1), получаем $N' = 2\pi k\sigma T^4 dl$ — (4). С другой стороны, мощность тока $N' = IU$ — (5), получаем $IU = 2\pi k\sigma T^4 dl$, откуда температура спирали $T = \left(\frac{IU}{2\pi k\sigma dl}\right)^{\frac{1}{4}} = 2208$ К.

4.7. Температура вольфрамовой спирали в 25-ваттной электрической лампочке $T = 2450$ К. Отношение ее энергетической светимости к энергетической светимости абсолютно черного тела при данной температуре $k = 0{,}3$. Найти площадь S излучающей поверхности спирали.

Решение:

Мощность излучения вольфрамовой спирали (см. задачу 18.6) $N' = k\sigma T^4 S$. Отсюда площадь излучающей поверхности спирали $S = \frac{N'}{k\sigma T^4} = 0{,}4$ см^2.

4.8. При нагревании абсолютно черного тела длина волны λ, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от 690 до 500 нм. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость тела?

Решение:

Из первого закона Вина $\lambda_m T = C_1$ имеем: $\lambda_1 T_1 = C_1$ — (1) и $\lambda_2 T_2 = C_1$ — (2). Приравнивая левые части уравнений (1) и (2), получаем $\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2$ или $\dfrac{T_1}{T_2} = \dfrac{\lambda_2}{\lambda_1}$ — (3). По закону Стефана — Больцмана для абсолютно черного тела энергетическая светимость $R_э = \sigma T^4$ — (4). Из формулы (4) имеем: $\dfrac{R_{э1}}{R_{э2}} = \left(\dfrac{T_1}{T_2}\right)^4$ — (5). Подставляя (3) в (5), окончательно получаем $\dfrac{R_{э1}}{R_{э2}} = \left(\dfrac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^4 = 3{,}63$.

4.9. На какую длину волны λ приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, имеющего температуру, равную температуре $t = 37°$ человеческого тела, т. е. $T = 310$ К?

Решение:

Из первого закона Вина $\lambda_m T = C_1$ имеем: $\lambda_m = \dfrac{C_1}{T} =$ $= 9{,}35$ мкм.

4.10.

18.19. Поверхность тела нагрета до температуры $T = 1000$ К. Затем одна половина этой поверхности нагревается на $\Delta T = 100$ К, другая охлаждается на $\Delta T = 100$ К. Во сколько раз изменится энергетическая светимость $R_э$ поверхности этого тела?

Решение:

По закону Стефана — Больцмана для серого тела $R'_э = k\sigma T^4$ — (1). После нагревания и охлаждения энергетическая светимость первой и второй половины будет соответственно равна $R'_{э1} = k\sigma(T + \Delta T)^4$ — (2) и $R'_{э2} = k\sigma(T - \Delta T)^4$ — (3). При этом средняя энергетическая светимость станет равной $\langle R'_э \rangle = \dfrac{R'_{э1} + R'_{э2}}{2}$ — (4). Подставляя (2) и (3) в (4), получаем $\langle R'_э \rangle = \dfrac{k\sigma\left[(T + \Delta T)^4 + (T - \Delta T)^4\right]}{2}$ — (5). Разделив (5) на (1), находим $\dfrac{\langle R'_э \rangle}{R'_э} = \dfrac{(T + \Delta T)^4 + (T - \Delta T)^4}{2T} = 1{,}06$.

4.11. Зачерненный шарик остывает от температуры $T_1 = 300$ К до $T_2 = 293$ К. На сколько изменилась длина волны λ, соответствующая максимуму спектральной плотности его энергетической светимости?

Решение:

Изменение длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости (см. задачу 18.18), равно $\Delta\lambda = \dfrac{C_1}{T_2} - \dfrac{C_1}{T_1} = 0{,}24$ мкм.

4.1. *Задачи для самостоятельного решения.*

4.1.1. Найти солнечную постоянную K, т. е. количество лучистой энергии, посылаемой Солнцем в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к солнечным лучам и находящуюся на таком же расстоянии от него, как и Земля. Температура поверхности Солнца $T=5800$ К. Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела.

4.1.2. Считая, что атмосфера поглощает 10% лучистой энергии, посылаемой Солнцем, найти мощность излучения N, получаемую от Солнца горизонтальным участком Земли площадью $S=0{,}5$ га. Высота Солнца над горизонтом $\varphi=30°$. Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела.

4.1.3. Зная значение солнечной постоянной для Земли (см. задачу 18.8), найти значение солнечной постоянной для Марса.

4.1.4. Какую энергетическую светимость $R_э$ имеет абсолютно черное тело, если максимум спектральной плотности его энергетической светимости приходится на длину волны $\lambda=484$ нм?

4.1.5. Мощность излучения абсолютно черного тела $N=10$ кВт. Найти площадь S излучающей поверхности тела, если максимум спектральной плотности его энергетической светимости приходится на длину волны $\lambda=700$ нм.

4.1.6. В каких областях спектра лежат длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если источником света служит: а) спираль электрической лампочки ($T=3000$ К); б) поверхность Солнца ($T=6000$ К); в) атомная бомба, в которой в момент взрыва развивается температура $T\approx10^7$ К? Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

4.1.7. Температура T абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 1000 до 3000 К. Во сколько раз увеличилась при этом его энергетическая светимость $R_э$? На сколько изменилась длина волны λ, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости? Во сколько раз увеличилась его максимальная спектральная плотность энергетической светимости r_λ?

4.1.8. Абсолютно черное тело имеет температуру $T_1=2900$ К. В результате остывания тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на $\Delta\lambda=9$ мкм. До какой температуры T_2 охладилось тело?

4.1.9. Какую мощность N надо подводить к зачерненному металлическому шарику радиусом $r=2$ см, чтобы поддерживать его температуру на $\Delta T=27$ К выше температуры окружающей среды? Температура окружающей среды $T=293$ К. Считать, что тепло теряется только вследствие излучения.

4.1.10 На сколько уменьшится масса Солнца за год вследствие излучения? За какое время τ масса Солнца уменьшится вдвое? Температура поверхности Солнца $T=5800$ К. Излучение Солнца считать постоянным.

Ответы на задачи раздела 4.1.

4.1.1. $K=1,37$ кВт/м^2.

4.1.2. $N=3,1$ МВт.

4.1.3. $K=595$ Вт/м^2.

4.1.4. $R_э=73,5$ МВт/м^2.

4.1.5. $S=6$ см^2.

4.1.6. а) $\lambda_m=1$ мкм — инфракрасная область; б) $\lambda_m=500$ нм — область видимого света; в) $\lambda_m \approx 300$ пм — область рентгеновских лучей.

4.1.7. В 81 раз; от $\lambda_1=2,9$ мкм до $\lambda_2=0,97$ мкм; в 243 раза.

4.1.8. $T_2=C_1T_1/(\Delta\lambda T_1+C_1)=290$ К.

4.1.9.

4.1.10 $\Delta m=\Delta W/c^2=1,4\cdot10^{17}$ кг; $\tau=7\cdot10^{12}$ лет.

18.20 $N=0,84$ Вт.

5. Квантовая природа света

Энергия фотона (кванта света) определяется формулой

$$\varepsilon = h\nu,$$

где $h = 6{,}626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν [Гц] — частота колебания.

Импульс и масса фотона

$$p = \frac{h\nu}{c}, \qquad m = \frac{h\nu}{c^2},$$

где $c = 2{,}99792458 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения света в вакууме.

Связь между энергией фотона, вызывающего внешний фотоэффект, и максимальной кинетической энергией вылетающих электронов дается формулой Эйнштейна

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где A — работа выхода электрона из металла, m — масса электрона. Если $v = 0$, то $h\nu_0 = A$, где ν_0 — частота света, соответствующая красной границе фотоэффекта.

Световое давление

$$P = \frac{E}{c}(1 + \rho),$$

где E — энергия, падающая на единицу поверхности за единицу времени, ρ — коэффициент отражения света.

Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии определяется формулой

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\varphi),$$

где φ — угол рассеяния, m — масса электрона.

Пучок элементарных частиц обладает свойством плоской волны, распространяющейся в направлении перемещения этих частиц. Длина волны λ, соответствующая этому пучку, определяется соотношением де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2Wm}},$$

где v — скорость частиц, m — масса частиц, W — их кинетическая энергия. Если скорость v частиц соизмерима со скоростью света c, то эта формула принимает вид

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}\sqrt{1 - \beta^2} = \frac{h}{\sqrt{2Wm_0 + W^2/c^2}},$$

где $\beta = v/c$, m_0 — масса покоя частицы.

Образцы решения задач.

$\boxed{5.1}$ Найти массу m фотона: а) красных лучей света ($\lambda = 700$ нм); б) рентгеновских лучей ($\lambda = 25$ пм); в) гамма-лучей ($\lambda = 1{,}24$ пм).

Решение:

Энергия фотона $E = h\nu$ — (1), где $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$ — частота колебания. Здесь $c = 3 \cdot 10^{8}$ м/с — скорость света. Т. е. уравнение (1) можно записать $E = h\dfrac{c}{\lambda}$ — (2). С другой стороны, согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$ — (3). Приравнивая (2) и (3), получаем $h\dfrac{c}{\lambda} = mc^2$, откуда $m = \dfrac{h}{c\lambda}$. Подставляя числовые данные, получим: а) $m = 3{,}2 \cdot 10^{-36}$ кг; б) $m = 8{,}8 \cdot 10^{-32}$ кг; в) $m = 1{,}8 \cdot 10^{-30}$ кг.

$\boxed{5.2}$ Найти энергию ε, массу m и импульс p фотона, если соответствующая ему длина волны $\lambda = 1{,}6$ пм.

Решение:

Имеем $E = h\dfrac{c}{\lambda}$; $m = \dfrac{h}{c\lambda}$ (см. задачу 19.1). Импульс фотона $p = mc = \dfrac{h}{\lambda}$. Подставляя числовые данные, получим $E = 1{,}15 \cdot 10^{-13}$ Дж; $m = 1{,}38 \cdot 10^{-30}$ кг; $p = 4{,}1 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с.

5.3 Ртутная дуга имеет мощность $N = 125$ Вт. Какое число фотонов испускается в единицу времени в излучении с длинами волн λ, равными: 612,1; 579,1; 546,1; 404,7; 365,5; 253,7нм? Интенсивности этих линий составляют соответственно 2; 4; 4; 2,9; 2,5; 4% интенсивности ртутной дуги. Считать, что 80% мощности дуги идет на излучение.

Решение:

Энергия излучения ртутной дуги $E = \eta N t$, по условию $t = 1$ с. Энергия одного кванта света $E_0 = h\nu = h\dfrac{c}{\lambda}$. Пусть I — интенсивность линии (в процентах), тогда количество квантов можно определить по формуле: $n = \dfrac{IE}{E_0} = \dfrac{I\eta N t\lambda}{hc}$.

Подставляя числовые данные, получим:

1) $n = \dfrac{0{,}02 \cdot 0{,}8 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 6123 \cdot 10^{-10}}{6{,}62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 6{,}2 \cdot 10^{18}$; 2) $n = 1.2 \cdot 10^{19}$;

3) $n = 1{,}1 \cdot 10^{19}$; 4) $n = 5{,}9 \cdot 10^{18}$; 5) $n = 4{,}6 \cdot 10^{18}$;

6) $n = 5{,}1 \cdot 10^{18}$.

5.4 С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны $\lambda = 520$ нм?

Решение:

Импульс электрона $p_e = m_e v$ — (1). Импульс фотона $p = \dfrac{h}{\lambda}$ — (2) (см. задачу 19.2). Приравнивая правые части уравнений (1) и (2), получим $m_e v = \dfrac{h}{\lambda}$, откуда $v = \dfrac{h}{\lambda m_e}$.

Подставляя числовые данные, получим $v = 1{,}4 \cdot 10^{3}$ м/с.

5.5 Какую энергию ε должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?

Решение:

Энергия фотона $E = mc^2$. Подставляя в эту формулу значения массы покоя электрона, получим $E = 81 \cdot 10^{-15}$ Дж или $E = 510 \cdot 10^{3}$ эВ.

5.6 В работе А. Г. Столетова «Актино-электрические исследования» (1888 г.) впервые были установлены основные законы фотоэффекта. Один из результатов его опытов был сформулирован так: «Разряжающим действием обладают лучи самой высокой преломляемости с длиной волны менее 295 нм». Найти работу выхода A электрона из металла, с которым работал А. Г. Столетов.

Решение:

Согласно закону сохранения энергии $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. Условие возникновения фотоэффекта: $h\nu = A$ или $\nu = \frac{A}{h}$ — (1). Поскольку $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то из (1) получим $A = \frac{hc}{\lambda}$ — (2). По условию $\lambda = 295 \cdot 10^{-9}$ м, тогда из (2) найдем $A = 4.2$ эВ.

5.7 Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта, для некоторого металла $\lambda_0 = 275$ нм. Найти минимальную энергию фотона, вызывающего фотоэффект.

Решение:

Минимальная энергия фотона должна быть равна работе выхода электрона, т. е. $E_{min} = A = \frac{hc}{\lambda_0}$. Подставляя числовые данные, получим $E_{min} = 7.2 \cdot 10^{-19}$ Дж или $E_{min} = 4.5$ эВ.

5.8 Найти частоту ν света, вырывающего из металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов $U = 3$ В. Фотоэффект сжимается при частоте света $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14}$ Гц. Найти работу выхода A электрона из металла.

Решение:

Работа выхода электрона $A = h\nu_0 = h\frac{c}{\lambda_0} = 2.48$ эВ. Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. Если электроны полностью задерживаются разностью потенциалов U, то по закону сохранения энергии $eU = \frac{mv^2}{2}$. Тогда $h\nu = A + eU$, откуда $\nu = \frac{A + eU}{h} = 13{,}2 \cdot 10^{14}$ Гц.

5.9 При фотоэффекте с платиновой поверхности электроны полностью задерживаются разностью потенциалов $U = 0{,}8$ В. Найти длину волны λ применяемого облучения и предельную длину волны λ_0, при которой еще возможен фотоэффект.

Решение:

Имеем $h\dfrac{c}{\lambda} = A + eU$, откуда $\lambda = \dfrac{hc}{A + eU} = 204$ нм. Предельную длину волны λ_0, при которой еще возможен фотоэффект, найдем из соотношения $A = h\nu_0 = h\dfrac{c}{\lambda_0}$, откуда $\lambda_0 = \dfrac{hc}{A} = 234$ нм.

5.10 Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda_0 = 70{,}8$ пм испытывают комптоновское рассеяние на парафине. Найти длину волны λ рентгеновских лучей, рассеянных в направлениях: а) $\varphi = \dfrac{\pi}{2}$; б) $\varphi = \pi$.

Решение:

Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии определяется формулой $\Delta\lambda = \dfrac{h}{mc}(1 - \cos\varphi)$, где φ — угол рассеяния, m — масса электрона. Отсюда $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = \lambda_0 + \dfrac{h}{mc}(1 - \cos\varphi)$. Подставляя числовые данные, получим: а) $\lambda = 73{,}22 \cdot 10^{-12}$ м; б) $\lambda = 75{,}6 \cdot 10^{-12}$ м.

5.11

19.31. Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda_0 = 20$ пм испытывают комптоновское рассеяние под углом $\varphi = 90°$. Найти изменение $\Delta\lambda$ длины волны рентгеновских лучей при рассеянии, а также энергию W_e и импульс электрона отдачи.

Решение:
Кинетическая энергия электрона равна энергии, потерянной фотоном: $W_e = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda_0 + \Delta\lambda} = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}$. Подставляя числовые данные, получим $W_e = 10{,}56 \cdot 10^{-16}$ Дж $= 6{,}6 \cdot 10^3$ эВ. Импульс и кинетическая энергия электрона связаны соотношением $W = \frac{p^2}{2m}$, откуда $p = \sqrt{2mW} =$ $= 4{,}1 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с.

5.12

19.33. Энергия рентгеновских лучей $\varepsilon = 0{,}6$ МэВ. Найти энергию W_e электрона отдачи, если длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на 20%.

Решение:
Кинетическая энергия электрона отдачи $W_e = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}$ (см. задачу 19.31). Энергия рентгеновских лучей $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda_0}$, т. е. можно записать, что $W_e = \varepsilon\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 + \Delta\lambda}$ — (1). По условию $\Delta\lambda = 0{,}2\lambda_0$; $\lambda_0 + \Delta\lambda = 1{,}2\lambda_0$, тогда из (1) получим $W = 0{,}17\varepsilon = 0{,}1$ МэВ.

5.13 Решить предыдущую задачу для пучка протонов.

Решение:
Найдем скорость протонов, прошедших разность потенциалов U_1 и U_2. По формуле (3) из предыдущей задачи получим $v_1 = 1{,}38 \cdot 10^4$ м/с; $v_2 = 1{,}38 \cdot 10^5$ м/с. Следовательно, в обоих случаях можно использовать формулу $\lambda = \frac{h}{mv}$. Подставляя числовые данные, получим $\lambda_1 = 29 \cdot 10^{-12}$ м; $\lambda_2 = 2{,}9 \cdot 10^{-12}$ м.

5.1. Задачи для самостоятельного решения.

5.1.1.

19.4. С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны $\lambda=520$ нм?

5.1.2. Импульс, переносимый монохроматическим пучком фотонов через площадку $S=2$ см^2 за время $t=0,5$ мин, равен $p=3\cdot10^{-9}$ кг·м/с. Найти для этого пучка энергию E, падающую на единицу площади за единицу времени.

5.1.3. При какой температуре T кинетическая энергия молекулы двухатомного газа будет равна энергии фотона с длиной волны $\lambda=589$ нм?

5.1.4. При высоких энергиях трудно осуществить условия для измерения экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений в рентгенах, поэтому допускается применение рентгена как единицы дозы для излучений с энергией квантов до $\varepsilon=3$ МэВ. До какой предельной длины волны λ рентгеновского излучения можно употреблять рентген?

5.1.5. Найти массу m фотона, импульс которого равен импульсу молекулы водорода при температуре $t=20$°С. Скорость молекулы считать равной средней квадратичной скорости.

5.1.6. В одном из опытов П. Н. Лебедева мощность падающего на кружки монохроматического света ($\lambda=560$ нм) была равна $N=8,33$ мВт. Найти число фотонов I, падающих в единицу времени на единицу площади кружков, и импульс силы $F\Delta\tau$, сообщенный единице площади кружков за единицу времени, для значений ρ, равных: 0; 0,5; 1. Данные прибора взять из условия задачи 19.22.

5.1.7. Русский астроном Ф. А. Бредихин объяснил форму кометных хвостов световым давлением солнечных лучей. Найти световое давление P солнечных лучей на абсолютно черное тело, помещенное на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля. Какую массу m должна иметь частица в кометном хвосте, помещенная на этом расстоянии, чтобы сила светового давления на нее уравновешивалась силой притяжения частицы Солнцем? Площадь частицы, отражающую все падающие на нее лучи, считать равной $S=0,5\cdot10^{-12}$ м^2. Солнечная постоянная $K=1,37$ кВт/м^2.

5.1.8. Найти световое давление P на стенки электрической 100-ваттной лампы. Колба лампы представляет собой сферический сосуд радиусом $r=5$ см. Стенки лампы отражают 4% и пропускают 6% падающего на них света. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение.

5.1.9. На поверхность площадью $S=0{,}01$ м² в единицу времени падает световая энергия $E=1{,}05$ Дж/с. Найти световое давление P в случаях, когда поверхность полностью отражает и полностью поглощает падающие на нее лучи.

5.1.10 Монохроматический пучок света ($\lambda=490$ нм), падая по нормали к поверхности, производит световое давление $P=4{,}9$ мкПа. Какое число фотонов I падает в единицу времени на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света $\rho=0{,}25$.

5.1.11 Найти длину волны де Бройля λ для: а) электрона, движущегося со скоростью $v=10^6$ м/с; б) атома водорода, движущегося со средней квадратичной скоростью при температуре $T=300$ К; в) шарика массой $m=1$ г, движущегося со скоростью $v=1$ см/с.

5.1.12 Найти длину волны де Бройля λ для электрона, имеющего кинетическую энергию: а) $W_1=10$ кэВ; б) $W_2=1$ МэВ.

5.1.13 Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов $U=200$ В, имеет длину волны де Бройля $\lambda=2{,}02$ пм. Найти массу m частицы, если ее заряд численно равен заряду электрона.

5.1.14 Составить таблицу значений длин волн де Бройля λ для электрона, движущегося со скоростью v, равной: $2\cdot10^8$; $2{,}2\cdot10^8$; $2{,}4\cdot10^8$; $2{,}6\cdot10^8$; $2{,}8\cdot10^8$ м/с.

5.1.15 α-частица движется по окружности радиусом $r=$ в однородном магнитном поле, напряженность которого $H=18{,}9$ кА/м. Найти длину волны де Бройля λ для α-частицы.

5.1.16 Найти длину волны де Бройля λ для атома водорода, движущегося при температуре $T=293$ К с наиболее вероятной скоростью.

Ответы на задачи раздела 5.1.

5.1.1. $v = 9{,}2 \cdot 10^5$ м/с.

5.1.2. $E = pc/St = 150$ Дж/(с·м^2).

5.1.3. $T = 9800$ К.

5.1.4. $\lambda \geqslant 0{,}41$ пм.

5.1.5. $m = 2{,}1 \cdot 10^{-32}$ кг.

5.1.6. $I = 1{,}2 \cdot 10^{21}$ с$^{-1}$·м$^{-2}$; $F_1\Delta\tau = 1{,}42$ мкН·с/м^2, $F_2\Delta\tau = 2{,}13$ мкН·с/м^2; $F_3\Delta\tau = 2{,}84$ мкН·с/м^2.

5.1.7. $P = 4{,}5$ мкПа; $m = 7{,}8 \cdot 10^{-16}$ кг.

5.1.8. $P = 10{,}4$ мкПа.

5.1.9. $P_1 = 0{,}7$ мкПа; $P_2 = 0{,}35$ мкПа.

5.1.10 $I = 2{,}9 \cdot 10^{21}$ с$^{-1}$·м$^{-2}$.

5.1.11 а) $\lambda = 730$ пм; б) $\lambda = 144$ пм; в) $\lambda = 6{,}6 \cdot 10^{-29}$ м, т. е. волновые свойства шарика обнаружить невозможно.

5.1.12 а) $\lambda = 12{,}2$ пм; б) $\lambda = 0{,}87$ пм.

5.1.13 $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг.

5.1.14

v, 10^8 м/с	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
λ, пм	2,70	2,25	1,82	1,39	0,925

5.1.15 $\lambda = 10$ пм.

5.1.16 $\lambda = 180$ пм.

Список использованной литературы.

1) «Сборника задач по общему курсу физики» В. С. Волькенштейн, 1995 г. изд. «Наука», Москва.

2) А.Г. Чертов, А.А. Воробьев «Задачник по физике», изд. Физматлит, Москва, 2007.

3) А.П. Рымкевич, П.А. Рымкевич, «Сборник задач по физике» изд. Просвещение, Москва, 1984.

4) И.Е. Иродов, «Задачи по общей физики» изд. Лань, Москва* Санкт-Петербург* Краснодар, 2007.

Содержание