МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра физики

П. Г. Кужир
Н. П. Юркевич
Г. К. Савчук

ОБЩАЯ ФИЗИКА: оптика, квантовая физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. Сборник задач

Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям

Минск
БНТУ
2018

УДК 53(076.1)(075.3)
ББК 22.3я729
К89

Р е ц е н з е н т ы :
кафедра физики Белорусского государственного
технологического университета;
доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики
Белорусского государственного университета *И. Р. Гулаков*

Кужир, П. Г.
К89 Общая физика: оптика, квантовая физика, физика атомного ядра и элементарные частицы. Сборник задач : учебное пособие / П.Г. Кужир, Н.П. Юркевич, Г.К. Савчук. – Минск : БНТУ, 2018. – 197 с.
ISBN 978-985-550-699-8.

Предназначено для практических занятий по курсу общей физики со студентами дневной формы обучения учреждений высшего образования по техническим специальностям.

Представлены краткие сведения из теории, примеры решения задач, а также задачи для самостоятельного решения, которые условно разделены на уровни, соответствующие десятибалльной системе оценки знаний. Все задачи сопровождаются ответами.

УДК 53(076.1)(075.3)
ББК 22.3я729

ISBN 978-985-550-699-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие предназначено для проведения практических занятий по курсу физики в высших учебных заведениях инженерно-технического профиля, а также для самостоятельной работы студентов; это продолжение учебных пособий для практических занятий «Механика. Статистическая физика и термодинамика», «Электричество и магнетизм» того же авторского коллектива.

В пособии представлены более 500 задач по разделам «Оптика», «Квантовая физика», «Физика атомного ядра и элементарные частицы», приведены определения основных понятий и физических величин, формулы с описанием всех входящих в них величин, справочные данные, а также примеры решения задач по каждой теме. Задачи для самостоятельного решения имеют ответы.

Особенность пособия в том, что задачи разделены по уровням сложности в соответствии с десятибалльной системой оценки знаний, что позволяет преподавателю эффективно организовать учебный процесс при работе в группах. Такое разбиение следует считать условным, поскольку оно было сделано на основе опыта преподавания курса физики для студентов инженерно-технических специальностей БНТУ. Разумеется, право оценки уровня сложности решения определенной задачи остается за преподавателями, которые будут использовать данное пособие на практике.

При подготовке к практическим занятиям обратите внимание на следующие методические аспекты решения задач.

1. Изучите соответствующий теоретический материал, ознакомьтесь с примерами решения задач по заданной теме.
2. Прочитайте условие задачи. Особое внимание обратите на поставленный в задаче вопрос, так как решение следует начинать именно с него.
3. Проанализируйте данные, представленные в задаче. Если необходимо, найдите в таблицах приложения недостающие значения констант, величин физических свойств веществ.

4. Определите физические состояния или процессы, рассматриваемые в задаче, а также законы и закономерности, которыми они описываются.

5. Сделайте краткую запись условия задачи, в которой должны быть отражены все исходные и искомые данные.

6. Сделайте схематический рисунок. Смысл рисунка заключается в графическом представлении информации, содержащейся в условии задачи в текстовом виде. Если рисунок отражает текстовую информацию достаточно полно, то запись математической модели физического процесса значительно облегчается, а следовательно, облегчается и само решение задачи. Запишите уравнения, описывающие рассматриваемый физический процесс, которые в совокупности с другими вспомогательными соотношениями и будут представлять математическую модель.

7. Векторные уравнения проецируйте на оси выбранной системы координат.

8. Задачу решайте, как правило, в общем виде, т. е. в конечной формуле искомая величина должна быть выражена через известные исходные данные. Решение задачи в общем виде позволяет проследить логику решения, оценить правильно оно или нет, а также снизить вероятность ошибки при выполнении численного расчета. Если решение становится достаточно громоздким, возможны промежуточные числовые расчеты.

9. Рекомендуется провести проверку полученной конечной формулы на соответствие размерностей. Если размерности величин, стоящих в формуле слева и справа от знака равенства, не сходятся, решение является неверным.

10. Используйте числовые значения известных величин в основных единицах СИ и подставьте в формулу. Выполните необходимые математические действия и получите результат.

11. При вычислениях применяйте правила действия с приближенными числами. Точность вычислений должна соответствовать точности исходных данных задачи.

12. Оцените правдоподобность полученного числового значения.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам:

заведующему кафедрой физики БГТУ, доктору физико-математических наук Н.Н. Круку;

профессору кафедры физики БГТУ, доктору физико-математических наук И.И. Наркевичу;

доценту кафедры физики БГТУ, кандидату физико-математических наук К.И. Рудику;

доценту кафедры физики БГТУ, кандидату физико-математических наук А.В. Мисевичу;

профессору кафедры общей физики БГУ, доктору физико-математических наук И.Р. Гулакову.

Профессионализм рецензентов и их многолетний научно-педагогический опыт позволили значительно улучшить качество данного учебного пособия.

Авторы с благодарностью примут конструктивные замечания и пожелания, касающиеся содержания учебного пособия.

1. ОПТИКА

1.1. ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. ФОТОМЕТРИЯ

Краткие теоретические сведения

Закон отражения света: луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, проведенный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; угол падения равен углу отражения

$$i = i',$$

где i – угол падения;
i' – угол отражения.

Абсолютный показатель преломления среды –

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

где c – скорость света в вакууме;
v – скорость света в среде.

Среда с бóльшим абсолютным показателем преломления называется **оптически более плотной средой**.

Закон преломления света: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости, при этом выполняется соотношение

$$\sin i / \sin r = n_{21} = n_2 / n_1,$$

где r – угол преломления.

Относительный показатель преломления второй среды относительно первой

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2},$$

где n_1 и n_2 − абсолютные показатели преломления первой и второй среды.

При распространении света из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную, наблюдается явление **полного внутреннего отражения** (рис. 1.1): при падении луча на границу раздела двух сред под углом полного внутреннего отражения преломленный луч распространяется по касательной к границе раздела двух сред в точке падения.

Предельный угол полного внутреннего отражения

$$\sin i_{пр} = n_2 / n_1.$$

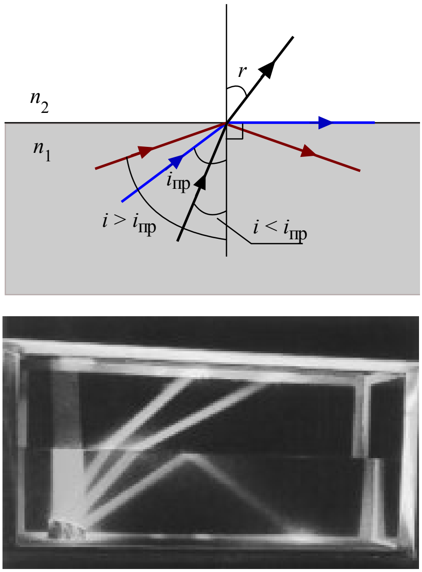


Рис. 1.1

Линзы – это прозрачные тела, ограниченные криволинейными поверхностями.

Оптическим центром линзы *O* (рис. 1.2) называется точка линзы, через которую лучи света идут не преломляясь.

Лучи света, идущие параллельно главной оптической оси *NN*, после прохождения линзы пересекаются в одной и той же точке *F*, лежащей на главной оптической оси. Точка *F* называется **главным фокусом (или фокусом) линзы**.

Расстояние от оптического центра линзы до ее фокусов называется **фокусным расстоянием *F***.

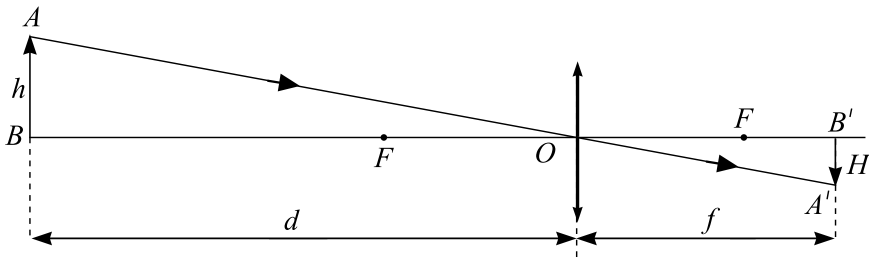


Рис. 1.2

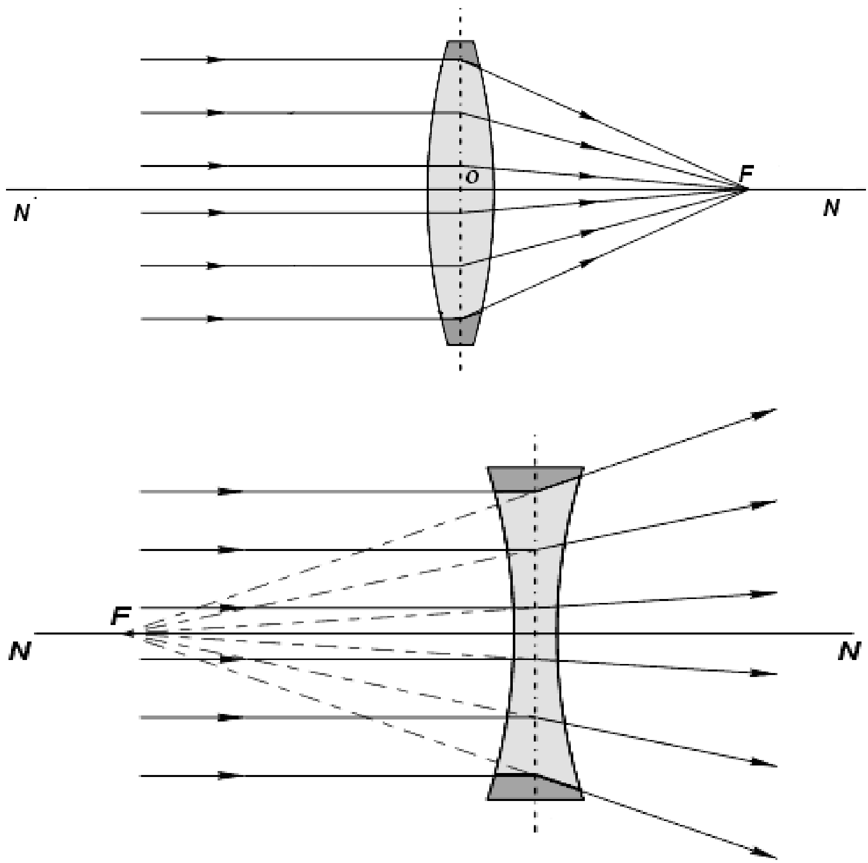


Рис. 1.3

Если в фокусе пересекаются сами преломленные лучи, то **линза** называется **собирающей**, а **фокус действительным**.

Фокус у рассеивающей линзы **мнимый,** так как в нем пересекаются не сами преломленные лучи, а их продолжение.

Линза считается тонкой, если толщина линзы много меньше, чем радиусы кривизны R_1 и R_2 обеих ее поверхностей.

Формула тонкой линзы (рис. 1.2)

$$\pm\frac{1}{F} = \pm\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f},$$

где F – фокусное расстояние линзы;

d – расстояние от оптического центра O линзы до предмета;

f − расстояние от оптического центра O линзы до изображения предмета.

В формуле тонкой линзы для собирающей линзы фокусное расстояние F берется со знаком «+», а для рассеивающей линзы $F < 0$. Перед d и f ставится знак «+», если предмет и изображение являются действительными, и знак «–», если предмет и изображение являются мнимыми (рис. 1.3).

На рис. 1.4 показано построение изображения в линзе.

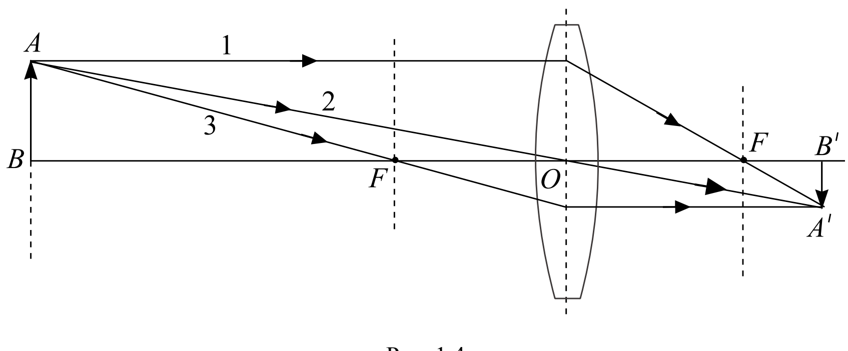


Рис. 1.4

Луч 1 – **параллельный главной оптической оси**; после преломления в линзе он проходит через фокус.

Луч 2 – проходящий через **центр линзы**; этот луч не меняет после линзы своего направления.

Луч 3 – **фокальный** луч; после преломления в линзе он параллелен главной оптической оси.

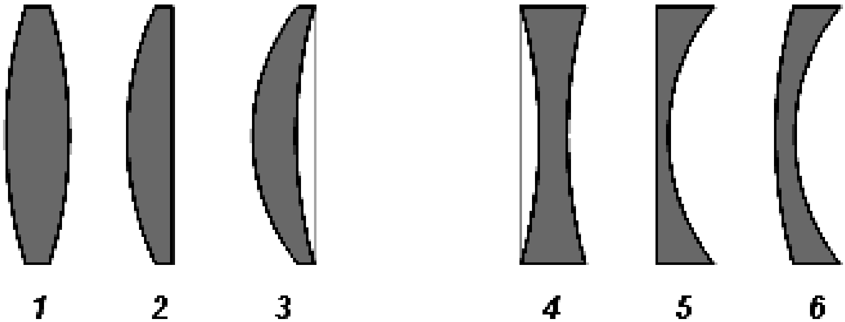
Линейное увеличение линзы (рис. 1.2)

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{H}{h},$$

где H – линейный размер изображения;

h – линейный размер предмета.

Виды линз:



Собирающие:
1 – **двояковыпуклая;**
2 – **плоско-выпуклая;**
3 – **вогнуто-выпуклая.**

Рассеивающие:
4 – **двояковогнутая;**
5 – **плоско-вогнутая;**
6 – **выпукло-вогнутая.**

Рис. 1.5

Оптическая сила линзы величина, характеризующая степень отклонения линзой проходящих через нее лучей, и обратная фокусному расстоянию

$$D = \frac{1}{F}.$$

За единицу оптической силы принята **диоптрия (1 дптр): 1 диотрия – это оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 метр.**

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F} = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$

где $n_{\text{л}}$ – абсолютный показатель преломления вещества линзы;

$n_{\text{ср}}$ – абсолютный показатель преломления вещества окружающей среды (одинаковой с обеих сторон линзы);

R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы ($R > 0$ для выпуклой, $R < 0$ для вогнутой поверхности линзы).

Оптическая сила системы m вплотную сложенных линз с оптическими силами D_1 D_2 … D_m

$$D = D_1 + D_2 + \ldots + D_m.$$

Общее линейное увеличение Г системы из двух линз равно произведению линейных увеличений обеих линз

$$\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2.$$

Полным световым потоком Ф называется энергия, излучаемая точечным источником в одну секунду. Единицей светового потока является **люмен (1 лм)**.

Полный световой поток, испускаемый точечным изотропным источником,

$$\Phi = 4\pi I,$$

где I – сила света источника.

Сила света для точечного источника

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

где $d\Phi$ – элементарный поток излучения источника света;

$d\Omega$ – элементарный телесный угол, в пределах которого это излучение распространяется.

Сила света измеряется **в канделах (1 кд)**.

Освещенность поверхности

$$E = \frac{\Phi}{S},$$

где S – площадь поверхности, по которой распределяется падающий на нее световой поток Ф. Единицей измерения освещенности является **люкс (1 люкс = 1 лм/м^2).**

Обобщенный закон освещенности, создаваемой точечным изотропным источником света: освещенность поверхности прямо пропорциональна силе света точечного источника, косинусу угла падения и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности

$$E = \frac{I}{R^2}\cos i,$$

где R – расстояние от поверхности до источника;

i – угол между нормалью к поверхности и направлением на источник.

Примеры решения задач

Задача 1. Луч света падет под углом $i = 30°$ на плоскопараллельную стеклянную пластинку, показатель преломления которой $n = 1{,}6$. Определите толщину пластинки h, если вышедший луч смещен относительно продолжения падающего луч на расстояние $d = 1{,}0$ см.

Дано:
$n = 1{,}6$;
$i = 30°$;
$d = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

Найти: h

Решение. Так как свет проходит через границу раздела сред из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду, то угол падения i больше угла преломления r. Вышедший из пластинки луч будет параллелен падающему на поверхность пластинки лучу (рис. 1.6) в силу обратимости хода лучей в однородных средах.

Из рассмотрения двух треугольников с общей гипотенузой следует, что

$$\frac{h}{\cos r} = \frac{d}{\sin(i-r)}.$$

Откуда

$$h = \frac{d\cos r}{\sin(i-r)} = \frac{d\cos r}{\sin i\cos r - \cos i\sin r}. \qquad (1.1)$$

По закону преломления имеем

$$\sin i / \sin r = n,$$

$$\sin r = \sin i/n.$$

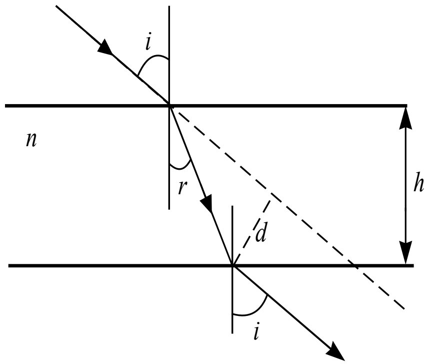


Рис. 1.6

Подставив последнее выражение в формулу (1.1), найдем толщину пластинки

$$h = \frac{d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}{\sin i\left(\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \sqrt{1 - \sin^2 i}\right)}.$$

$$h = \frac{1{,}0\cdot 10^{-2}\sqrt{1{,}6^2 - 0{,}5^2}}{0{,}5\left(\sqrt{1{,}6^2 - 0{,}5^2} - \sqrt{1 - 0{,}5^2}\right)} = 4{,}7\cdot 10^{-2}\ \text{м}.$$

Ответ: h = 4,7 · 10^{-2} м.

Задача 2. Изображение A_1B_1 предмета AB получено с помощью рассеивающей тонкой линзы (рис. 1.7). Размеры предмета AB = 10,0 см, изображения A_1B_1 = 5,0 см, между точками B и B_1 на главной оптической оси расстояние r = 4,0 см. Найдите фокусное расстояние линзы F, расстояния от линзы до предмета d и от линзы до изображения предмета f.

Дано:
$AB = 1{,}0 \cdot 10^{-1}$ м;
$A_1B_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ м;
$r = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

Найти: F, d, f

Решение. Рассеивающая линза имеет мнимый фокус и формирует мнимое изображение предмета. Поэтому формулу тонкой линзы запишем следующим образом

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}. \qquad (1.2)$$

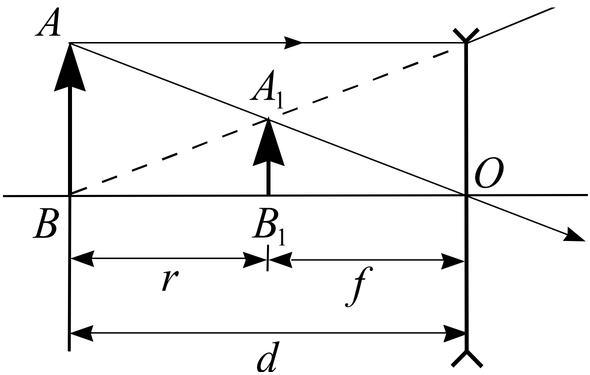


Рис. 1.7

Из рис. 1.7 видно, что

$$r = d - f. \qquad (1.3)$$

Из подобия треугольников AOB и A_1OB_1 находим

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{d}{f}.$$

Откуда следует, что

$$\frac{d}{f} = \frac{10 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-2}} = 2, \; d = 2f.$$

Используя выражение (1.3), имеем $d = 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ м, $f = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ м.

Определяем фокусное расстояние F из уравнения (1.2):

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{2f} - \frac{1}{f},$$

$$-\frac{1}{F} = -\frac{1}{2f},$$

$$F = 2f.$$

Фокусное расстояние линзы $F = 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ м.

Ответ: $F = 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ м; $d = 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ м; $f = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ м.

Задача 3. Космонавт видит предмет, если освещенность зрачка глаза $E = 2{,}0 \quad 10^{-9}$ лк. На каком максимальном расстоянии R будет видеть космонавт в открытом космосе звезду силой света $I = 1000$ кд?

Дано: $E = 2{,}0 \cdot 10^{-9}$ лк; $I = 1000$ кд	**Решение.** Освещенность определяется по формуле
Найти: R	$$E = \frac{I}{R^2}\cos i.$$

Так как угол между нормалью к поверхности глаза космонавта и направлением к звезде как источнику света $i = 0$, то

$$E = \frac{I}{R^2}.$$

Отсюда находим искомое расстояние

$$R = \sqrt{\frac{I}{E}}.$$

Подставляя числовые данные, определяем

$$R = \sqrt{\frac{1000}{2,0 \cdot 10^{-9}}} = 7,07 \cdot 10^5 \text{ м} = 707 \text{ км}.$$

Ответ: *R* = 707 км.

ЗАДАЧИ

4 балла

1.1 Под каким углом β к горизонту следует расположить плоское зеркало, чтобы осветить дно колодца отраженными от него солнечными лучами? Свет падает под углом α = 30° к горизонту.
Ответ: β = 60°.

1.2 Тонкий предмет высотой h = 30,0 см стоит на столе на расстоянии d = 1,3 м от основания зеркала, наклоненного отражающей поверхностью под углом α = 45° к столу. Определите минимальное расстояние l от точки на предмете до точки на изображении.
Ответ: *l* = 2,0 м.

1.3 Пучок параллельных лучей света шириной a = 20,0 см выходит из стеклянной плоскопараллельной пластинки в воздух. Определите ширину пучка b в воздухе, если угол падения луча на границу стекло – воздух i = 30°, показатель преломления стекла n = 1,8.
Ответ: *b* = 0,102 м.

1.4 Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол полного внутреннего отражения $i_{пр}$ = 42°23'. Определите скорость света v в скипидаре.
Ответ: v = 2,0 · 10⁸ м/с.

1.5 Луч света переходит из стекла в воду. Найдите предельный угол полного внутреннего отражения $i_{пр}$. Показатели преломления стекла $n_1 = 1{,}57$, воды $n_2 = 1{,}33$.

Ответ: $i_{пр}$ = 58°.

1.6 Из жидкости на границу ее раздела с воздухом падает луч света. Угол падения луча $i = 30°$. Отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу. Найдите показатель преломления жидкости n.

Ответ: $n = \sqrt{3}$.

1.7 По известному ходу лучей определите, какая линза находится в ящике (рис. 1.8, *а* и *б*).

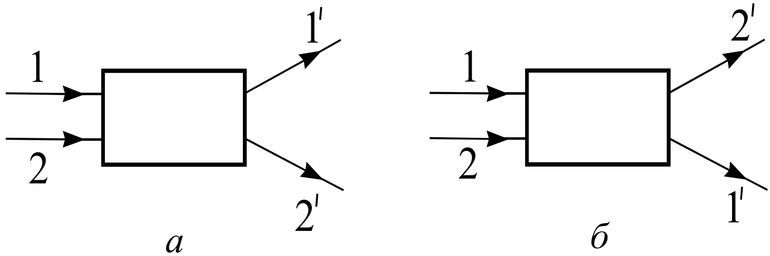


Рис. 1.8

1.8 Постройте изображение точечного источника света S, расположенного на оптической оси в случаях: а) собирающей линзы (рис. 1.9, *а*); б) рассеивающей линзы (рис. 1.9, *б*).

1.9 Расстояние от предмета до линзы и от линзы до изображения $d = f = 0{,}25$ м. Во сколько раз k увеличится высота изображения, если предмет сместить на расстояние $\Delta d = 0{,}10$ м по направлению к линзе?

Ответ: k = 4,76.

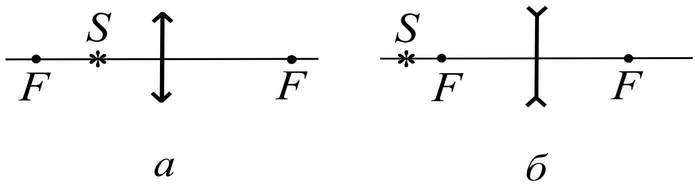


Рис. 1.9

Предмет находится перед рассеивающей линзой на расстоянии $2F$. На каком расстоянии f от линзы получится мнимое изображение и во сколько раз k оно будет меньше самого предмета?

Ответ: $f = 2/3\ F$; $k = 3$.

1.10 Освещенность E_1 плоской поверхности при угле падения лучей $\alpha_1 = 60°$ равна 50,0 лк. Определите освещенность данной поверхности E_2 при том же источнике света, но при угле падения лучей $\alpha_2 = 30°$.

Ответ: $E_2 = 86{,}6$ лк.

1.11 Лампа с силой света $I = 200{,}0$ кд укреплена на потолке комнаты. Найдите полный световой поток Ф, падающий на стены комнаты и на ее пол.

Ответ: $Ф = 1{,}3 \cdot 10^3$ лм.

5−6 баллов

1.12 Луч света падает на систему двух взаимно перпендикулярных зеркал. Угол падения луча на первое зеркало $i_1 = 17°$. Отражаясь от первого зеркала, луч падает на второе. Определите угол отражения луча i_2 от второго зеркала.

Ответ: $i_2 = 73°$.

1.13 Свая длиной $l = 2{,}0$ м выступает над поверхностью воды на высоту $h = 1{,}0$ м. Определите длину тени L от сваи на дне озера, если угол падения лучей $i = 30°$. Показатель преломления воды $n = 1{,}33$.

Ответ: $L = 0{,}98$ м.

1.14 На плоскопараллельную прозрачную пластинку толщиной $d = 2{,}0$ см падает луч под углом $i = 60°$. Определите угол преломления этого луча r, если при выходе из пластинки луч смещается относительно первоначального направления на $l = 1{,}0$ см. Найдите показатель преломления пластинки n.
Ответ: $r = 36°$, $n = 1{,}45$.

1.15 Монохроматический луч падает нормально на боковую поверхность призмы, преломляющий угол которой равен $\varphi = 40°$. Показатель преломления материала призмы для этого луча $n = 1{,}5$. Найдите отклонение луча δ на выходе из призмы от первоначального направления.
Ответ: $\delta = 34°$.

1.16 На рис. 1.10, *а*, *б* показан ход светового луча 1 до и после линзы. Найдите построением положение главных фокусов линзы и ход в ней световых лучей 2 и 2'.

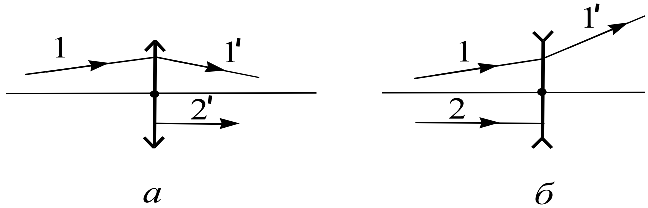


Рис. 1.10

1.17 Найдите построением положение фокусов линзы для лучей, изображенных на рис. 1.11, *а*, *б*.
Постройте ход луча до линзы, если известен его ход после прохождения линзы (рис. 1.12, *а*, *б*). Положения главных фокусов линзы известны.

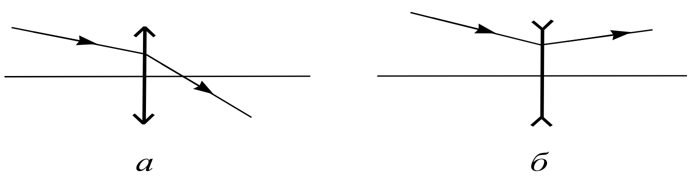


Рис. 1.11

1.18 На оптической оси собирающей линзы на расстояниях d_1 = 20,0 см и d_2 = 40,0 см от линзы находятся два точечных источника света. Найдите фокусное расстояние линзы F, если изображения этих источников оказываются в одной и той же точке.
Ответ: F = 0,267 м.

1.19 Расстояние от предмета до экрана L = 105 см. Тонкая собирающая линза, помещенная между ними, дает на экране уменьшенное изображение предмета. Если линзу переместить на l = 32,0 см, на экране получится увеличенное изображение. Найдите фокусное расстояние линзы F.
Ответ: F = 0,24 м.

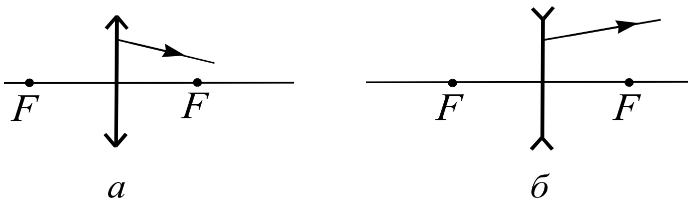


Рис. 1.12

1.20 Действительное изображение предмета, полученное с помощью собирающей линзы, находятся от нее на расстоянии f_1 = 80,0 см. Собирающую линзу заменяют рассеивающей с таким же фокусным расстоянием. Изображение предмета в этом случае находится на расстоянии f_2 = 20,0 см. Определите фокусное расстояние линз F и увеличение Γ_1 и Γ_2.
Ответ: F = 0,32 м; Γ_1 = 1,5; Γ_2 = 0,375.

1.21 Мнимое изображение предмета находится на расстоянии f = 1,0 м от собирающей линзы с фокусным расстоянием F = 0,25 м. На каком расстоянии d от линзы расположен предмет?
Ответ: d = 0,20 м.

1.22 Определите силу света I лампы уличного освещения, необходимую для того, чтобы освещенность на земле посередине между фонарями была равна E = 0,20 лк. Лампы подвешены на высоте h = 10,0 м, расстояние между столбами l = 40,0 м. При расчете учитывать освещенность, создаваемую двумя соседними фонарями.
Ответ: *I* = 110 кд.

1.23 Свет от электрической лампочки в 200,0 кд падает под углом 45° на рабочее место, его освещенность 141,0 лк. Найдите: 1) на каком расстоянии r от рабочего места находится лампочка; 2) на какой высоте h от рабочего места она висит.
Ответ: *r* = 1,0 м; *h* = 0,7 м.

1.24 В центре квадратной комнаты площадью S = 36,0 м^2 висит лампа. Найдите высоту h, на которой должна висеть лампа, чтобы освещенность в углах комнаты была наибольшей.
Ответ: *h* = 3,0 м.

7−8 баллов

1.25 Сечение стеклянной призмы имеет форму равностороннего треугольника. Луч падает на одну из граней перпендикулярно к ней. Найдите угол δ между направлением падающего луча и луча, вышедшего из призмы. Показатель преломления стекла n = 1,5.
Ответ: δ = 60°.

1.26 Точечный источник света находится в воде на некоторой глубине под центом плавающего круглого диска, диаметр которого D. Показатель преломления воды равен n. На какой максимальной глубине H должен находиться источник, чтобы лучи света не выходили из воды?

Ответ: $\boldsymbol{H = \dfrac{D\sqrt{n^2 - 1}}{2}}$.

1.27 Светящаяся точка S расположена перед собирающей линзой. Постройте ход произвольного луча SK, падающего на собирающую линзу. Положение оптического центра O линзы и ход луча SBC представлен на рис. 1.13.

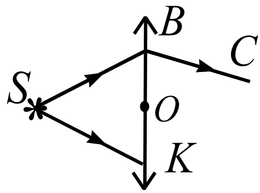


Рис. 1.13

1.28 Светящаяся точка описывает окружность радиуса r в плоскости, перпендикулярной к главной оптической оси собирающей линзы с оптической силой D. Изображение точки на экране описывает окружность радиуса R. Найдите расстояние f от линзы до экрана.
Ответ: $\boldsymbol{f = (R + r)/rD}$.

1.29 Автомобиль, скорость которого $v = 72{,}0$ км/ч, фотографируют с расстояния $d = 200{,}0$ м, при этом изображение на пленке сместилось на расстояние $\Delta l = 0{,}01$ мм. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата $F = 5{,}0$ см. Определите время экспозиции t.
Ответ: $\boldsymbol{t = 2{,}0 \cdot 10^{-3}}$ **с.**

1.30 Светящаяся точка движется с постоянной скоростью $v = 1{,}0$ см/с в направлении перпендикулярном оптической оси. С какой скоростью v_1 движется изображение этой точки, если она находится на расстоянии $d = 20{,}0$ см от линзы? Фокусное расстояние линзы $F = 15{,}0$ см.
Ответ: $\boldsymbol{v_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-2}}$ **м/с.**

1.31 Из двух стекол с показателями преломления $n_1 = 1{,}5$ и $n_2 = 1{,}7$ сделаны две одинаковые двояковыпуклые линзы. Найдите отношение фокусных расстояний этих линз F_1/F_2.
Ответ: $\boldsymbol{F_1/F_2 = 1{,}4}$.

1.32 Двояковыпуклая линза имеет радиусы кривизны $R_1 = R_2 = 0{,}50$ м. Показатель преломления стекла линзы $n = 1{,}5$. Найдите оптическую силу D линзы.
Ответ: $\boldsymbol{D = 2{,}0}$ **дптр**.

1.33 Лист бумаги размером 10,0 x 30,0 см освещается светом от лампы силой в 100,0 кд, причем на него падает 0,5 % всего посылаемого лампой света. Найдите освещенность E этого листа.

Ответ: $\boldsymbol{E}$ = 210,0 лк.

1.34 Над площадью висит фонарь, создающий освещенность $E_1 = 10{,}0$ лк в тех точках, в которых лучи падают на землю под углом α_1 ($\cos\alpha_1 = 0{,}30$). Найдите освещенность E_2 в точках, в которых лучи падают на землю под углом α_2 ($\cos\alpha_2 = 0{,}60$).

Ответ:. $\boldsymbol{E_2}$ = 80,0 лк.

1.35 Над центром круглого стола диаметром 2,0 м висит лампа, сила света которой 100,0 кд. Считая лампу точечным источником света, вычислить изменение освещенности края стола при постепенном подъеме лампы в интервале $0{,}50 \le h \le 0{,}90$ м через каждые 10,0 см. Постройте график $E = f(h)$.

Ответ: $\boldsymbol{E(h) = 100h/(h^2 + 1)^{1/2}}$.

1.36 Светящаяся лампочка висит на высоте h над столом. На каком расстоянии b от точки стола, находящейся непосредственно под лампой, освещенность стола уменьшается в n раз?

Ответ: $\boldsymbol{b = h}\ \sqrt{n^{4|3} - 1}$.

9−10 баллов

1.37 На стеклянную плоскопараллельную пластинку толщиной d падает луч света под углом i. Луч частично отражается от верхней поверхности, частично преломляется, снова отражается от нижней поверхности и затем выходит через верхнюю поверхность. Найдите угол выхода β и длину пути l, пройденного лучом в пластине.

Ответ: $\boldsymbol{\beta = i}$; $\boldsymbol{l = 2d/\cos\beta}$.

1.38 Луч света падает под углом i на стопку плоских прозрачных пластин одинаковой толщины, показатель преломления каждой из которых в k раз меньше, чем у вышележащей. При каком наименьшем угле падения i_0 луч не пройдет сквозь стопку? Показатель преломления верхней пластины равен n, число пластин равно N.
Ответ: $i_0 = \arcsin (n/k^{N-1})$.

1.39 Луч света падает нормально на боковую поверхность стеклянного клина. Каким должен быть угол клина φ для того, чтобы луч, отразившись от второй, посеребренной поверхности клина, испытал на ней полное отражение? Показатель преломления стекла равен n.
Ответ: $1/2 \arcsin (1/n) < \varphi < \pi/4$.

1.40 На стеклянный клин перпендикулярно его грани падает тонкий луч света (рис. 1.14). Показатель преломления стекла $n = 1{,}41$, угол при вершине клина $\varphi = 10°$. Сколько светлых пятен k будет видно на экране, поставленном за клином?
Ответ: $k = 2$.

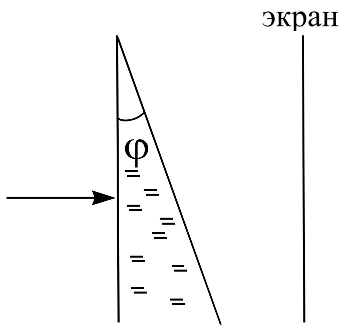


Рис. 1.14

1.41 Луч света падет на однородный прозрачный шар, проникает в него и достигает поверхности раздела шар-воздух. Найдите угол φ между падающим и вышедшим лучом. Угол падения луча $i = 26°$, угол преломления $r = 17°$.
Ответ: $\varphi = 18°$.

1.42 На расстоянии $L = 1{,}0$ м от небольшого экрана расположен точечный источник света. Посередине между источником и экраном поместили линзу. Оказалось, что освещенность экрана не изменилась. Определите фокусное расстояние линзы F.
Ответ: $F = 0{,}125$ см.

1.43 Площадка освещается двумя различными лампами, висящими на столбе одна над другой на высоте $h_1 = 8{,}0$ м и $h_2 = 27{,}0$ м. На каком расстоянии l от основания столба находятся точки площадки, освещенность которых не изменится, если поменять лампы местами?
Ответ: l = 26,6 м.

1.44 Лампа, подвешенная к потолку, дает в горизонтальном направлении силу света в 60,0 кд. Какой световой поток Ф падает на картину площадью 0,50 м^2, висящую вертикально на стене в 2,0 м от лампы, если на противоположной стене находится большое зеркало на расстоянии 2,0 м от лампы?
Ответ: Ф = 8,3 лм.

1.2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Краткие теоретические сведения

Интерференция света – явление перераспределения энергии в пространстве при наложении когерентных волн.

Когерентные волны – монохроматические волны, у которых разность фаз $\Delta\varphi$ с течением времени не изменяется.

Скорость света в среде

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

где c – скорость света в вакууме;

n – абсолютный показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны в однородной среде

$$L = nl,$$

где l– геометрическая длина пути световой волны.

Оптическая разность хода (рис. 1.15) двух световых волн

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1 l_1 - n_2 l_2,$$

где n_1, n_2 – показатели преломления первой и второй сред;

l_1 и l_2 – геометрические длины путей волн в первой и второй средах.

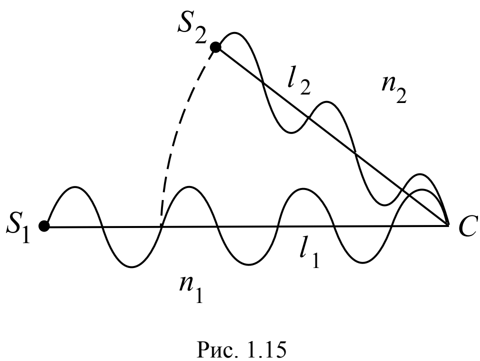


Рис. 1.15

Связь между разностью фаз Δφ и оптической разностью хода Δ световых волн

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta.$$

Условия усиления света при интерференции в среде

$$\Delta = m\lambda_0, \quad \Delta\varphi = 2\pi m, \quad m = 0, 1, 2, \ldots.$$

Условия ослабления света при интерференции в среде

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2}, \quad \Delta\varphi = (2m+1)\,\pi, \qquad m = 0, 1, 2, 3, \ldots.$$

где λ_0 – длина волны света в вакууме (воздухе).

При отражении от оптически более плотной среды волна изменяет фазу на π, что соответствует потере $\lambda_0/2$, что следует учесть при определении оптической разности хода интерферирующих лучей в тонкой пленке.

Оптическая разность хода световых волн при отражении (рис. 1.16, *а*) **от тонкой пленки, находящейся в вакууме или в воздухе,**

$$\Delta = 2dn\cos r - \frac{\lambda_0}{2}$$

или

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda_0}{2},$$

где n – показатель преломления вещества пленки;

d – толщина пленки;

r – угол преломления;

i – угол падения света на пленку.

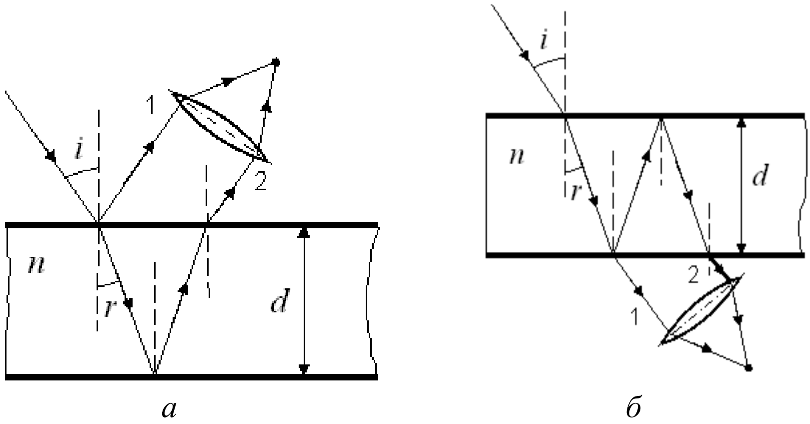


Рис. 1.16

Условие максимумов интерференции при отражении света от тонкой пленки:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2}, \;\; m = 0, 1, 2, 3, \ldots.$$

Условие минимумов интерференции при отражении света от тонкой пленки:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = 2m\frac{\lambda_0}{2}, \;\; m = 1, 2, 3, \ldots.$$

При отражении света от менее плотной среды потери $\lambda_0/2$ не происходит, поэтому **при интерференции в проходящем свете** (рис. 1.16, *б*) **максимумам интерференции соответствуют минимумы в отраженном свете, минимумам в проходящем свете – максимумы в отраженном.**

Условие максимумов интерференции в проходящем свете в тонкой пленке:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = 2m\frac{\lambda_0}{2}, \;\; m = 1, 2, 3, \ldots.$$

Условие минимумов интерференции в проходящем свете в тонкой пленке

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots.$$

Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете (рис. 1.17, *а*)

$$r_m^{\text{св}} = \sqrt{(2m-1)R\lambda_0 / 2}, \ \ m = \ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots.$$

где m – номер кольца;

R – радиус кривизны линзы;

λ_0 – длина волны света в вакууме.

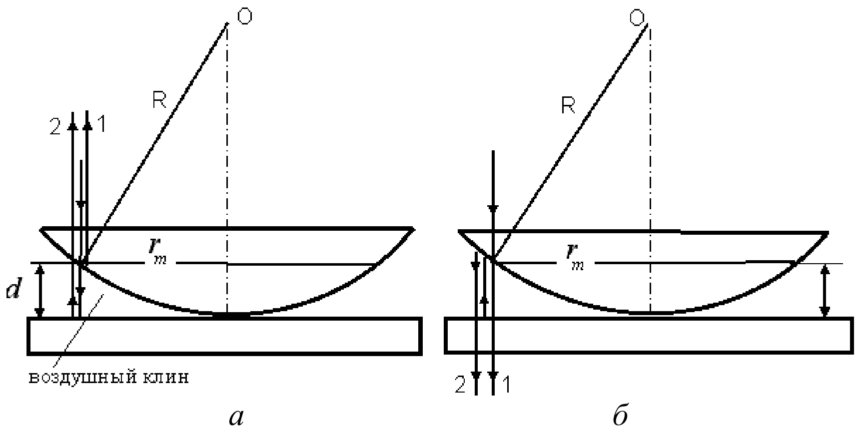


Рис. 1.17

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете (рис. 1.17, *а*)

$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0}, \quad m = \ 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots$$

Радиус светлых колец Ньютона в проходящем свете (рис. 1.17, *б*)

$$r_m^{\text{св}} = \sqrt{mR\lambda_0},\ m = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots.$$

Радиус темных колец Ньютона в проходящем свете (рис. 1.17, *б*)

$$r_m = \sqrt{(2m-1)R\lambda_0 / 2},\ \ m = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots.$$

Связь толщины воздушной прослойки *d* с радиусом линзы *R* и радиусом *m*-го кольца Ньютона

$$d = \frac{r_m^2}{2R}.$$

Интерференция света от двух когерентных источников света (щели Юнга – рис. 1.18**, зеркала и бипризмы Френеля):**

а) **положения последовательных интерференционных максимумов**

$$x_{\max} = \pm m\lambda_0 \frac{L}{d},\ (m = 0;\ 1;\ 2\ldots);$$

б) **положения последовательных интерференционных минимумов:**

$$x_{\min} = \pm(2m-1)\lambda_0 \frac{L}{2d},\ (m = 1;\ 2\ldots);$$

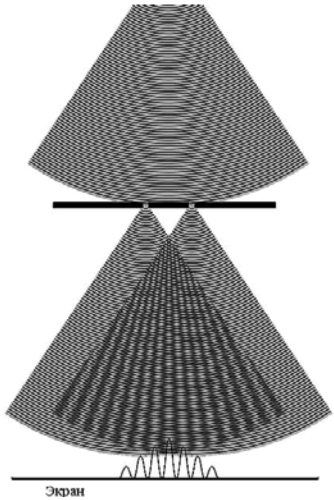


Рис. 1.18

в**) расстояние между соседними максимумами или минимумами:**

$$\Delta x = \lambda_0 \frac{L}{d},$$

где x – координаты максимумов и минимумов интенсивности I;

d – расстояние между источниками света;

L – расстояние от источников света до экрана (рис. 1.19).

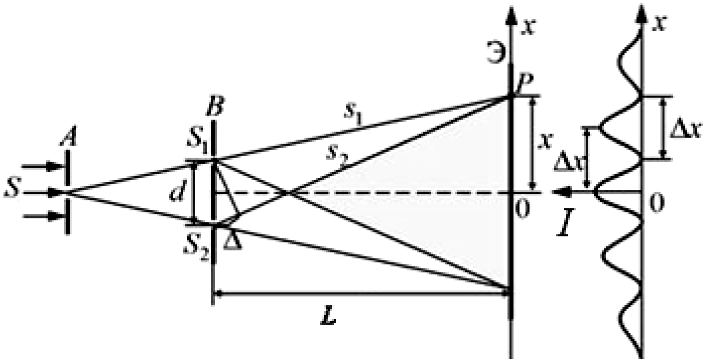


Рис. 1.19

Интерферометр – измерительный прибор, принцип действия которого основан на явлении интерференции, позволяющий разделить световой поток на две части, обеспечить прохождение его частей по различным оптическим путям и затем осуществить схождение обеих частей потока, создающих доступную наблюдению интерференционную картину.

Для измерения малых разностей расстояний или малых изменений оптических свойств среды применяются различные интерферометры: Жамена, Майкельсона, Линника, Физо, Маха и др.

Один из простейших двухлучевых интерферометров – интерферометр **Жамена.** Он состоит из двух толстых плоскопараллельных пластин 1 и 2 (рис. 1.20, *а*). При раздвоении луча в точке A возникает оптическая разность хода

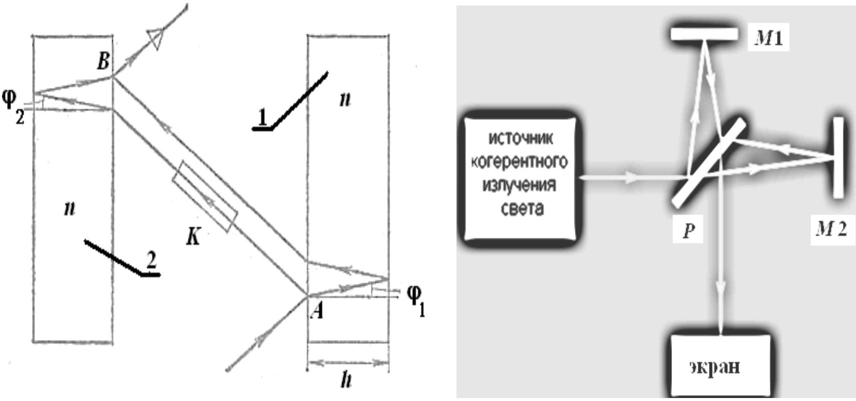
$$\Delta = 2hn\cos\varphi_1 - \frac{\lambda_0}{2},$$

где h – толщина пластин;

n – показатель преломления вещества обеих пластин;

φ_1 – угол преломления света в первой пластине;

λ_0 – длина волны света в вакууме.



а *б*

Рис. 1.20

При схождении лучей в точке *B* разность хода равна

$$\Delta = -2hn\cos\varphi_2 + \frac{\lambda_0}{2},$$

где φ_2 – угол преломления света во второй пластине.

Малейшее изменение условий распространения одного из лучей меняет интерференционную картину. Так, заполняя кювету *K* разными газами, можно определять показатель их преломления. Меняя давление в кювете, можно изучать влияние давления на показатель преломления (или влияние температуры) и т. д.

Интерферометр Майкельсона (рис. 1.20, *б*) состоит из светоделительного зеркала *P*, разделяющего входящий луч на два, которые, в свою очередь, отражаются зеркалами *M*1 и *M*2. На полупрозрачном зеркале разделенные лучи вновь направляются в одну сторону, чтобы, смешавшись на экране, образовать интерференционную картину.

Примеры решения задач

Задача 1. Для уменьшения потерь света при отражении от стекла на поверхность объектива нанесена тонкая прозрачная пленка с показателем преломления $n_1 = 1,3$. При какой наименьшей толщине пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света, длина волны в воздухе которого $\lambda = 560$ нм? Показатель преломления стекла, из которого изготовлен объектив, $n_2 = 1,7$. Считать, что лучи падают нормально к поверхности объектива.

Дано:	
$n_1 = 1,3$;	
$n_2 = 1,7$;	
$\lambda = 5,60 \cdot 10^{-7}$ м	
Найти: $d_{\min}$	

Решение. Свет, падая на объектив, отражается как от передней, так и от задней поверхностей тонкой пленки. Ход лучей изображен на рис. 1.21. Отраженные когерентные лучи 1 и 2 интерферируют между собой. Так как показатель преломления воздуха ($n = 1,0$) меньше показателя преломления вещества пленки ($n_1 = 1,3$), который, в свою очередь, меньше показателя преломления стекла ($n_2 = 1,7$), то в обоих случаях отражение происходит от среды, оптически более плотной, чем та среда, в которой распространяется падающий луч. Поэтому фаза колебаний луча 1 при отражении в точке A изменяется на π радиан (потеря полуволны), и точно так же на π изменяется фаза луча 2 при отражении в точке B. Следовательно, результат интерференции этих лучей будет такой же, как если бы никакого изменения фазы колебаний ни у того, ни у другого луча не было.

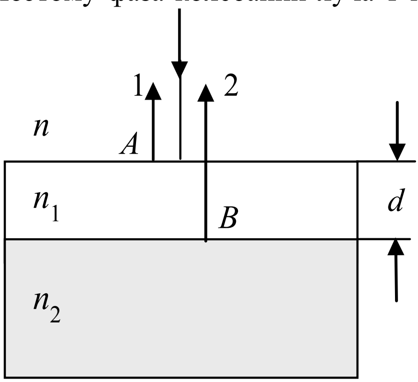


Рис. 1.21

Результирующая интенсивность минимальна, если оптическая разность хода интерферирующих лучей 1 и 2 равна нечетному числу полуволн,

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}. \tag{1.4}$$

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 при нормальном падении лучей на пленку ($i = 0$) равна

$$\Delta = 2\,dn_1. \tag{1.5}$$

Из соотношений (32.1) и (32.2) получаем

$$2\,dn_1 = (2m+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Тогда искомая толщина пленки

$$d = (2m+1)\frac{\lambda}{4n_1}.$$

Значению $d_{\min}$ соответствует $m = 0$. Следовательно,

$$d_{\min} = \frac{5{,}60\cdot 10^{-7}}{4\cdot 1{,}3} = 1{,}07\cdot 10^{-7}\ \text{м} = 1{,}1\cdot 10^{-7}\ \text{м}.$$

Ответ: $\boldsymbol{d_{\min} = 1{,}1\cdot 10^{-7}}$ **м.**

Задача 2. Определить радиус четвертого темного кольца Ньютона r_4 в отраженном свете, если между линзой с радиусом кривизны $R = 5{,}0$ м и поверхностью плоской стеклянной пластинки, к которой она прижата, находится вода. Показатель преломления воды $n = 1{,}33$. Длина волны света в воздухе $\lambda = 589$ нм.

Дано:	Решение.
$R = 5{,}0$ м; $\lambda = 5{,}89\cdot 10^{-7}$ м; $n = 1{,}33$	**Решение.** При отражении света от верхней и нижней границ водяной прослойки между плоской поверхностью и соприкасающейся с ней линзой образуются когерентные лучи 1 и 2 (рис. 1.22), которые при наложении интерферируют. При $r \ll R$ и нормальном
Найти: r_4	

падении света лучи 1 и 2 будут практически параллельны. Оптическая разность хода этих лучей для точек, соответствующих толщине водяной прослойки d, определяется по формуле

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

где n – показатель преломления воды.

Величина $\frac{\lambda}{2}$ представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении луча 2 от оптически более плотной среды (стекла).

Темные кольца будут наблюдаться в тех местах, где разность хода равна нечетному числу полуволн:

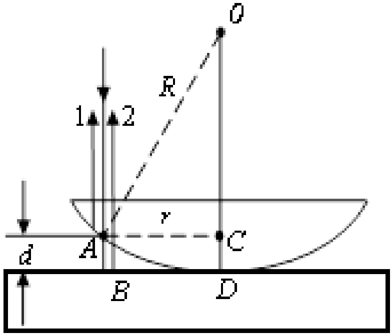


Рис. 1.22

$$2\,dn + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\,\frac{\lambda}{2}, \quad m = \ 0,\ 1,\ 2,\ 3\ldots.$$

Откуда

$$2\,dn = m\lambda,$$

$$d = \frac{m\lambda}{2n}.$$

Толщина слоя d между линзой и плоской поверхностью связана с соответствующим радиусом наблюдаемого кольца следующим образом (см. рис. 1.22):

$$d = \frac{r_m^2}{2R}.$$

Радиус темного кольца получаем, приравнивая правые части двух последних формул:

$$r_m = \sqrt{2Rd} = \sqrt{\frac{Rm\lambda}{n}}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$r_4 = \sqrt{\frac{5 \cdot 4 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{1{,}33}} = 2{,}97 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ответ: $r_4 = 2{,}97 \cdot 10^{-3}$ м.

Задача 3. Плосковыпуклая стеклянная линза с оптической силой $D = 2{,}0$ дптр выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус r_4 четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 0,70 мм. Определить длину световой волны λ.

Дано:
$D = 2{,}0$ дптр;
$r_4 = 7{,}0 \cdot 10^{-4}$ м;
$m = 4$

Найти: λ

Решение. Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете определяются по формуле

$$r_m = \sqrt{mR\lambda},$$

где m – номер кольца;
R – радиус линзы;
λ – длина световой волны в воздухе.

Тогда

$$\lambda = \frac{r_m^2}{mR}. \qquad (1.6)$$

Радиус линзы можно определить, воспользовавшись формулой, определяющей оптическую силу D линзы:

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

где D – оптическая сила линзы;

F – фокусное расстояние;

n – показатель преломления стекла линзы;

R_1 и R_2 – радиусы поверхностей линзы.

Так как линза плосковыпуклая ($R_2 = \infty$), то, принимая $R_1 = R$, получим

$$D = \frac{1}{F} = (n-1)\frac{1}{R},$$

$$R = \frac{n-1}{D}. \tag{1.7}$$

Подставив выражение (1.7) в формулу (1.6), получим

$$\lambda = \frac{r_m^2 \cdot D}{m(n-1)}.$$

Вычислим длину волны:

$$\lambda = \frac{\left(7{,}0 \cdot 10^{-4}\right)^2 \cdot 2{,}0}{4 \cdot (1{,}5 - 1)} = 0{,}49 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 490 \text{ нм}.$$

Ответ: λ = 490 нм.

ЗАДАЧИ

4 балла

1.45 Сколько длин волн *N* монохроматического света с частотой $5{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц уложится на пути длиной $l = 1{,}2$ мм: 1) в вакууме; 2) в стекле с показателем преломления $n = 1{,}5$?
Ответ: 1) $N_1 = 2{,}0 \cdot 10^3$, 2) $N_2 = 3{,}0 \cdot 10^3$.

1.46 Определите длину отрезка l_1 в вакууме, на котором укладывается столько же длин волн, сколько их укладывается на отрезке $l = 3{,}0$ мм в воде.
Ответ: $l_1 = 4{,}0$ мм.

1.47 Какова оптическая разность хода Δ двух когерентных лучей в веществе, абсолютный показатель преломления которого 1,6? Геометрическая разность хода этих лучей равна 2,5 см.
Ответ: Δ = 4 см.

1.48 Две световые когерентные волны при наложении друг на друга взаимно погашаются. Означает ли это, что световая энергия превращается в другие формы?
Ответ: Нет.

1.49 В некоторую точку пространства приходят световые пучки когерентного излучения с оптической разностью хода 6,0 мкм. Что произойдет в этой точке – усиление или ослабление света, если длина волны равна 1) 500 нм; 2) 480 нм?
Ответ: 1) усиление,
2) ослабление.

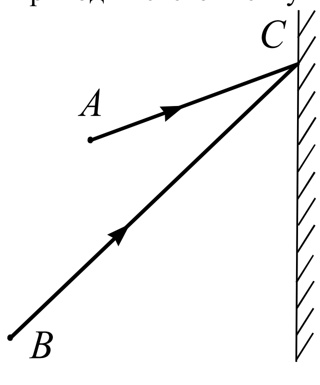


Рис. 1.23

1.50 *AC* и *BC* – когерентные лучи, имеющие длину волны, равную 540 нм (рис. 1.23). Что будет

наблюдаться в точке C, если $AC = 4{,}00$ м, $BC = 4{,}27$ м?
Ответ: максимум.

1.51 Два когерентных луча с длинами волн 404 нм пересекаются в одной точке. Что будет наблюдаться в этой точке, если оптическая разность хода лучей равна 17,0 мкм?
Ответ: Ослабление света.

1.52 Найдите все длины волн видимого света, находящихся в интервале $380 \text{ нм} \le \lambda \le 760 \text{ нм}$, которые будут 1) максимально усилены, 2) максимально ослаблены. Оптическая разность хода интерферирующих волн $\Delta = 1{,}80$ мкм.
Ответ: 1) $\lambda_1 = 0{,}60$ мкм; $\lambda_2 = 0{,}45$ мкм; 2) $\lambda_3 = 0{,}40$ мкм; $\lambda_4 = 0{,}51$ мкм; $\lambda_5 = 0{,}72$ мкм.

1.53 Почему условия максимумов и минимумов интерференционной картины в тонких пленках в отраженном свете обратны условиям максимумов и минимумов интерференционной картины в проходящем свете?

1.54 Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном свете $r_2 = 0{,}40$ мм. Определите радиус кривизны плосковыпуклой линзы, если она освещается светом с длиной волны $\lambda = 640$ нм.
Ответ: $R = 0{,}125$ м.

1.55 Установка для получения колец Ньютона освещена белым светом, падающим по нормали к поверхности линзы. Радиус кривизны линзы $R = 5{,}0$ м. Найдите радиусы четвертого синего ($r_с$) и третьего красного ($r_к$) колец. Длина волны синего света $\lambda_с = 400$ нм, красного света $\lambda_к = 630$ нм. Наблюдение ведется в проходящем свете.
Ответ: $r_с = 2{,}8 \cdot 10^{-3}$ м; $r_к = 3{,}1 \cdot 10^{-3}$ м.

5–6 баллов

1.56 Оптическая разность хода Δ двух интерферирующих лучей в воздухе равна 0,3λ. Определить разность фаз Δφ.
Ответ: Δφ = 0,6 π рад.

1.57 На пути пучка света поставлена стеклянная пластинка с показателем преломления $n = 1{,}5$ и толщиной $d = 1{,}0$ мм так, что угол падения луча $i = 30^{\circ}$. Насколько изменится оптическая длина пути Δ светового пучка?
Ответ: На Δ = 550 мкм.

1.58 Могут ли световые волны красного и зеленого цвета иметь одинаковые длины волн? Если могут, то при каких условиях? Длина волны в вакууме красного света $\lambda_к = 760$ нм, зеленого $\lambda_з = 570$ нм.
Ответ: могут; $n = 1{,}33$.

1.59 Два когерентных источника, расположенных на расстоянии d друг от друга и испускающие свет с длиной волны λ, дают на экране интерференционную картину. Расстояние от экрана до линии, на которой расположены источники, равно L. Найти расстояние Δx между соседними интерференционными полосами.

Ответ: $\Delta x = \frac{L}{d}\lambda.$

1.60 Расстояние L от щелей Юнга до экрана равно 1,0 м. Определить расстояние d между щелями, если на отрезке экрана длиной $l = 1{,}0$ см укладывается $N = 10$ темных интерференционных полос. Принять длину волны $\lambda = 700$ нм.
Ответ: $d = 7{,}0 \cdot 10^{-4}$ м.

1.61 При помощи зеркала Френеля получили интерференционные полосы, пользуясь красным светом. Как изменится ширина интерференционных полос, если воспользоваться синим светом? Ответ обоснуйте.
Ответ: ширина полос уменьшится.

1.62 На стеклянную пластину с показателем преломления $n = 1{,}5$ нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления $n_1 = 1{,}3$. Пластинка освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны $\lambda = 640$ нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину $d_{\min}$ должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость?
Ответ: $d_{\min} = 123$ нм.

1.63 На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500{,}0$ нм. Отраженный от пластинки свет максимально усилен вследствие интерференции. Определите минимальную толщину $d_{\min}$ пленки. Показатель преломления материала пленки $n = 1{,}4$.
Ответ: $d_{\min} = 89{,}3$ нм.

1.64 На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1{,}33$ падает белый свет под углом 45°. При какой наименьшей толщине пленки $d_{\min}$ отраженные лучи будут окрашены в желтый свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм?
Ответ: $d_{\min} = 133$ нм.

1.65 На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1{,}3$, находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине отраженный свет с длиной волны $\lambda = 0{,}55$ мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?
Ответ: $d_{\min} = 0{,}11$ мкм.

1.66 Прозрачная пластинка толщиной 2,4 мкм освещена лучами оранжевого света, падающими перпендикулярно ее поверхности, длина волны которых 0,6 мкм. Будет ли окрашена эта пластинка в отраженном свете оранжевым цветом, если показатель преломления пластинки равен 1,5?
Ответ: нет, пластинка будет черной.

1.67 На тонкую глицериновую пленку (n = 1,47) толщиной d = 1,5 мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определите длины волн λ лучей видимого участка спектра, лежащих в диапазоне $0{,}380 \le \lambda \le 0{,}760$ мкм, которые будут ослаблены в результате интерференции в отраженном свете.
Ответ: λ_1 = 0,735 мкм; λ_2 = 0,630 мкм; λ_3 = 0,551 мкм; λ_4 = 0,490 мкм; λ_5 = 0,441 мкм; λ_6 = 0,401 мкм.

1.68 Установка для наблюдения колец Ньютона освещена монохроматическим светом, падающим по нормали к плоской поверхности линзы. Радиус кривизны линзы R = 8,6 м. Радиус четвертого темного кольца (нулевым считаем центральное темное пятно) r_4 = 4,5 мм. Наблюдение ведется в отраженном свете. Какова длина волны λ падающего света?
Ответ: λ = 589 нм.

1.69 На горизонтальную стеклянную пластинку помещена плосковыпуклая линза плоской стороной вверх. Сверху линза освещена монохроматическим светом с длиной волны λ = 500 нм. Найти радиус R линзы, если радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете r_4 = 2,0 мм.
Ответ: r = 2,0 м.

7–8 баллов

1.70 Чему равна амплитуда A колебания, являющегося суперпозицией N некогерентных колебаний одинакового направления и одинаковой амплитуды?
Ответ: $A = \sqrt{N}$.

1.71 От двух когерентных источников, излучающих свет с длиной волны λ = 0,80 мкм, на экране наблюдается интерференционная картина. Когда на пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили мыльную пленку ($n_{пл}$ = 1,33), то минимумы интерференции стали располагаться на месте максимумов и наоборот. При какой наименьшей толщине пленки d_{min} это возможно?
Ответ: d_{min} = 1,21 мкм.

1.72 Наблюдается интерференция от двух когерентных источников света с длиной волны λ = 480 нм. Когда на пути одного из пучков поместили тонкую пластинку из кварца с показателем преломления $n = 1{,}46$, интерференционная картина сместилась на m = 69 полос. Определите толщину d кварцевой пластинки.
Ответ: $d = m\lambda / (n\text{-}1)$ = 1,73 мм.

1.73 На пути одного из лучей интерферометра Жамена поместили откачанную трубку длиной l = 10,0 см. При заполнении трубки хлором интерференционная картина для длины волны λ = 590,0 нм сместилась на k = 131 полос. Найти показатель преломления хлора.
Ответ: n = 1,000773.

1.74 На тонкий стеклянный клин падает нормально параллельный пучок света с длиной волны λ = 500,0 нм. Расстояние между соседними темными интерференционными полосами в отраженном свете a = 0,50 мм. Определите угол α клина. Показатель преломления стекла n = 1,6.
Ответ: $\alpha = 3{,}125 \cdot 10^{-4}$ рад = 64,5''.

1.75 При освещении светом с длиной волны λ = 589 нм мыльной пленки, расположенной вертикально, видны темные горизонтальные полосы. Расстояние между серединами темных полос a = 5,0 мм. Показатель преломления мыльной воды n = 1,33. Чему равен угол φ между поверхностями пленки?
Ответ: φ = 9''.

1.76 На поверхность стеклянного объектива нанесена тонкая пленка, показатель преломления которой n_1 = 1,2 («просветляющая» пленка). Показатель преломления стекла n = 1,5. При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света с длиной волны λ = 550 нм?
Ответ: d = 114 мкм.

1.77 Между стеклянной пластиной и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. При этом показатель преломления жидкости n меньше, чем показатель преломления пластины. Найти показатель преломления жидкости n, если радиус r_3 третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны $\lambda = 0{,}60$ мкм равен 0,82 мм. Радиус кривизны линзы $R = 0{,}50$ м.
Ответ: $\boldsymbol{n} = 1{,}34$.

1.78 Плосковыпуклая стеклянная линза с оптической силой в одну диоптрию лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в проходящем свете $r_5 = 1{,}10$ мм. Определите длину световой волны λ.
Ответ: $\lambda = 484$ мкм.

1.79 Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 590{,}0$ нм. Радиус кривизны линзы $R = 5{,}0$ см. Определить толщину d_3 воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье светлое кольцо.
Ответ: $\boldsymbol{d_3} = 737{,}5$ нм.

1.80 Оба луча света в интерферометре Жамена распространяются в цилиндрических трубках длиной $l = 10{,}0$ см. Воздух из трубок откачан. Когда в одну из трубок был впущен водород, интерференционная картина сместилась на $m = 23{,}7$ полос. Найти показатель преломления n водорода. Длина волны света $\lambda = 590$ нм.
Ответ: $\boldsymbol{n} = 1{,}00014$.

9–10 баллов

1.81 На стеклянный клин с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей света с длиной волны $\lambda = 0{,}60$ мкм. Число возникающих при этом интерференционных полос m, приходящихся на отрезок длиной l, равно 10. Определить угол α клина.
Ответ: $\alpha = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ рад = 41,2".

1.82 На рис. 1.24 изображе-на схема опыта Френеля по наблюдению интерференции. Два одинаковых плоских зеркала образуют между собой угол $\pi - 2\alpha$ $(2\alpha = 0{,}10$ рад). Точечный источник света S находится на биссектрисе угла на расстоянии $d = 20{,}0$ см от линии пересечения зеркал. При каком минимальном размере зеркал a на удаленном экране могут наблюдаться интерференционные полосы?

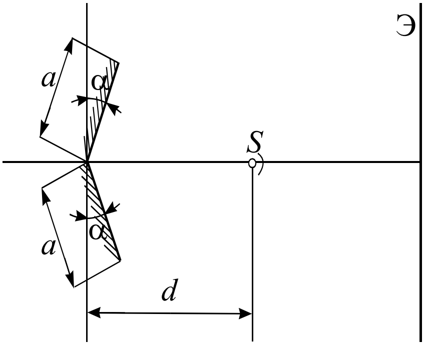


Рис. 1.24

Ответ: $\boldsymbol{a = 2{,}0 \cdot 10^{-2}}$ м.

1.83 На рис. 1.25 изображена схема интерференционного опыта Ллойда. Точечный источник света S расположен на расстоянии $b = 20{,}0$ см от левого края плоского зеркала AB на высоте $a = 10{,}0$ см над плоскостью зеркала. Длина зеркала $d = 10{,}0$ см. Определите вертикальный размер c интерференционной картины на экране, расположенном на расстоянии $L = 1{,}0$ м от источника.

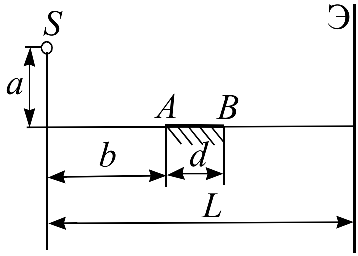


Рис. 1.25

Ответ: $\boldsymbol{c}$ = 16,6 см.

1.84 Точечный источник монохроматического света находится на расстоянии $s = 1{,}0$ мм от большого плоского зеркала и на расстоянии $L = 4{,}0$ м от экрана, перпендикулярного зеркалу (рис. 1.26). Какое рас-

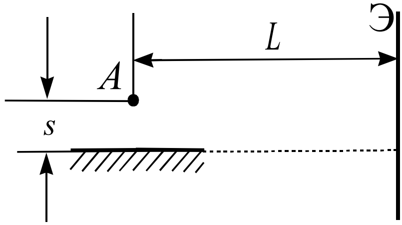


Рис. 1.26

стояние x между соседними максимумами освещенности на экране, если длина волны света $\lambda = 600$ нм?
Ответ: $\Delta x = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ м.

1.85 Два когерентных источника монохроматического света с длиной волны $\lambda = 600{,}0$ нм находятся на расстоянии $A_1 A_2 = 1{,}0$ мм друг от друга и на одинаковом расстоянии $L = 3{,}0$ м от экрана (рис. 1.27). Найти расстояние x между ближайшими максимумами освещенности (серединами светлых полос) на экране.

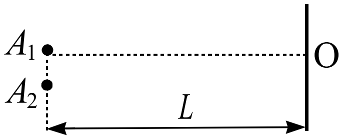


Рис. 1.27

Ответ: $\Delta x = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ м.

1.86 Собирающую линзу диаметра $D = 5{,}0$ см с фокусным расстоянием $F = 50{,}0$ см разрезали по диаметру пополам и половинки раздвинули на расстояние $d = 5{,}0$ мм (рис. 1.28). Точечный источник света S расположен на расстоянии $a = 1{,}00$ м от линзы. На каком расстоянии l от линзы можно наблюдать интерференционную картину? Щель между половинками линзы закрыта.

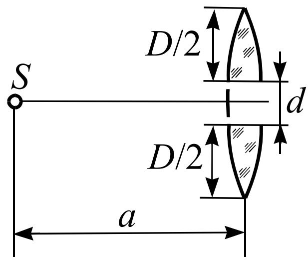


Рис. 1.28

Ответ: $l = 1{,}22$ м.

1.87 Собирающая линза с фокусным расстоянием $F = 10{,}0$ см разрезана по диаметру, и части линзы раздвинуты на расстояние $d = 0{,}50$ мм. Перед линзой на расстоянии $a = 15{,}0$ см находится точечный источник монохроматического света с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Оцените число N светлых интерференционных полос на экране, расположенном за линзой на расстоянии $L = 60{,}0$ см. Промежуток между частями линзы закрыт непрозрачной перегородкой.
Ответ: $N = 25$.

1.3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Краткие теоретические сведения

Дифракцией света называют явления, обусловливающие отклонения от законов геометрической оптики при распространении света в среде с резкими неоднородностями.

Если λ – длина волны света, b – размер препятствия, L – расстояние от препятствия до точки наблюдения, то величина соотношения $\frac{b^2}{L\lambda}$ определяет характер распространения света в среде с препятствиями:

$$\frac{b^2}{L\lambda} = \begin{cases} \gg 1 - \textbf{геометрическая оптика: свет распространяется прямолинейно;} \\ \ll 1 - \textbf{дифракция Фраунгофера: источник света и экран, служащий для наблюдения дифракционной картины, находятся на бесконечно большом расстоянии от препятствия, вызвавшего дифракцию;} \\ \sim 1 - \textbf{дифракция Френеля: источник света и экран, служащий для наблюдения дифракционной картины, находятся на конечном расстоянии от препятствия, вызвавшего дифракцию.} \end{cases}$$

Радиус *m*–ой зоны Френеля для сферической волны (рис. 1.29)

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

где m = 1, 2, 3, … – номер зоны Френеля.

a – расстояние от источника света S до волновой поверхности;

b – расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения P;

λ – длина волны.

Радиус *m*-ой зоны Френеля для плоской волны (*a*→∞)

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

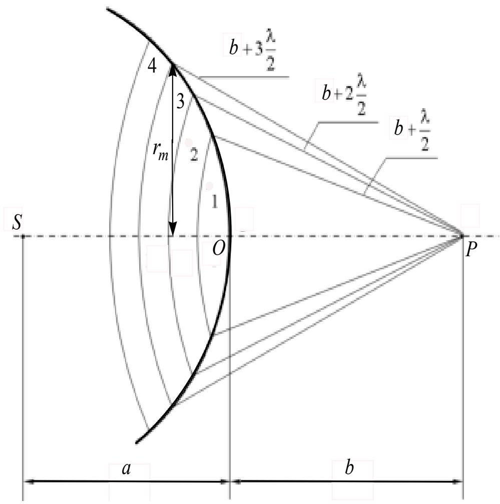


Рис. 1.29

Условия усиления и ослабления света при дифракции на круглом отверстии:

если отверстие открывает **нечетное число *m* зон Френеля**, то в точке наблюдения *P* будет наблюдаться **максимум интенсивности света**;

если отверстие открывает **четное число *m* зон Френеля**, то в точке наблюдения *P* будет наблюдаться **минимум интенсивности света**.

Амплитуда результирующего колебания, возбуждаемого в точке наблюдения *P* всеми зонами Френеля, открытыми отверстием (рис. 1.30),

$$A = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2},$$

где знак плюс соответствует нечетному числу *m* зон Френеля, минус – четному числу *m* зон.

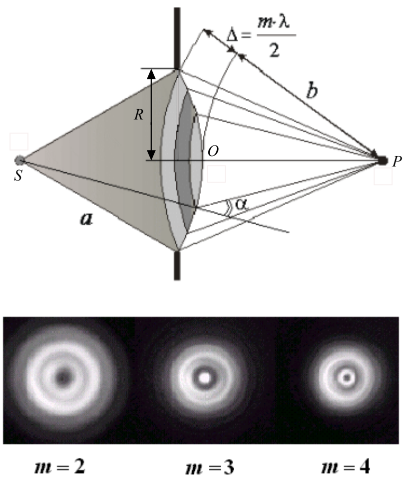


Рис. 1.30

Условия усиления и ослабления света при дифракции на диске: в точке наблюдения *P* будет наблюдаться **максимум интенсивности света**, если число закрытых зон Френеля невелико. Амплитуда световых колебаний в точке наблюдения P равна половине амплитуды, обусловленной первой открытой зоной: $A = \frac{A_{m+1}}{2}$, где m – число закрытых зон Френеля.

Зонная пластинка – это стеклянная пластинка, на поверхность которой нанесено непрозрачное покрытие в виде колец, закрывающих только четные (или только нечетные) зоны Френеля.

Фокусное расстояние *F* зонной пластинки

$$F = \frac{r_m^2}{m\lambda},$$

где r_m – радиус внешнего края m-й зоны;

m – число зон Френеля;

λ – длина волны падающего на зонную пластинку света.

Если центр зонной пластинки светлый, то m – нечетное и в формулу входит внешний радиус r_m светлого кольца пластинки. Если же центр пластинки темный, то r_m – внешний радиус темного кольца.

Условие минимумов при дифракции на одной щели при нормальном падении лучей (дифракция Фраунгофера)

$$a \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2},$$

где a – ширина щели;

$m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ – порядковый номер минимума;

φ – угол дифракции, соответствующий m -му минимуму.

Условие максимумов при дифракции на одной щели при нормальном падении лучей (дифракция Фраунгофера)

$$a \sin \varphi = (2m+1) \frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ – порядковый номер максимума;

φ – угол дифракции, соответствующий m -му максимуму.

Условие главных максимумов при дифракции света на дифракционной решетке

$$d\sin\varphi = m\lambda,$$

где m = 0, ±1, ±2, ±3, – порядковый номер максимума (порядок спектра);

$d = a + b$ – период (постоянная) дифракционной решетки;

a – ширина щели;

b – ширина непрозрачного промежутка;

φ – угол дифракции, соответствующий m-му максимуму.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN,$$

где $\Delta\lambda$ – наименьшая разница длин волн двух спектральных линий с длинами волн λ и (λ + + $\Delta\lambda$), при которой эти линии видны раздельно (рис. 1.31) в спектре, полученном на дифракционной решетке;

N – полное число щелей решетки.

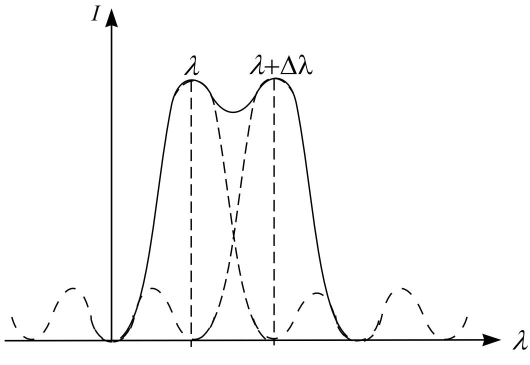


Рис. 1.31

Критерий Рэлея: середина максимума одной спектральной линии совпадает с серединой ближайшего минимума другой спектральной линии.

Угловая дисперсия спектральных приборов

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

Угловая дисперсия дифракционной решетки

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

Пространственной (трехмерной) дифракционной решеткой называется такая оптически неоднородная среда, неоднородности которой периодически повторяются при изменении всех трех пространственных координат. Примером пространственной дифракционной решетки является кристаллическая решетка твердого тела.

Дифракционные максимумы при дифракции рентгеновских лучей на кристаллах удовлетворяют условию Вульфа – Брэггов:

$$2d\sin\theta = m\lambda,$$

где m = 1, 2, 3, … – порядок дифракционного максимума;

d − расстояния между атомными плоскостями кристалла;

θ – угол скольжения.

Примеры решения задач

Задача 1. Радиус четвертой зоны Френеля для сферической волны равен r_4 = 3,0 мм. Определите радиус шестой зоны Френеля.

Дано: $r_4 = 3{,}0\cdot10^{-3}$ м **Найти**: r_6.	**Решение.** Поскольку волна сферическая, то радиус четвертой зоны Френеля определяется следующим выражением:

$$r_4 = \sqrt{\frac{ab}{a+b}4\lambda}. \tag{1.8}$$

Радиус 6-й зоны Френеля

$$r_6 = \sqrt{\frac{ab}{a+b}6\lambda}. \tag{1.9}$$

Разделив выражение (1.9) на (1.8), получим

$$\frac{r_6}{r_4} = \sqrt{\frac{3}{2}}, \quad r_6 = r_4\sqrt{\frac{3}{2}}.$$

Отсюда находим, что

$$r_6 = 3{,}0 \cdot 10^{-3}\sqrt{\frac{3}{2}} = 3{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ответ: r_6 = 3,7 · 10^{-3} м.

Задача 2. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Угол φ, соответствующий второй светлой полосе, равен 1°. Какому числу длин волн k падающего света равна ширина щели?

Дано:	
φ = 1°;	
m = 2	
Найти: k	

Решение. Светлые полосы при дифракции на щели наблюдаются при условии

$$a\sin\varphi = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (1.10)$$

где m = 0, ±1, ±2, ±3, …

Так как в (1.10) m = 2, то

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

Подставляя числовые данные, находим

$$k = \frac{5}{2\sin 1^\circ} = 38.$$

Ответ: k = 38.

Задача 3. На дифракционную решетку, постоянная которой $d = 2{,}0$ мкм, по нормали к ее поверхности падает монохроматический свет. Определите наибольший порядок дифракционного максимума m_{max}, который позволяет наблюдать данная решетка для света с длиной волны $\lambda = 555$ нм.

Дано:
$d = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ м;
$\lambda = 5{,}55 \cdot 10^{-7}$ м

Найти: m_{max}

Решение. Из формулы, определяющей положение главных максимумов дифракционной решетки, найдем порядок дифракционного максимума m:

$$m = \frac{d \sin \varphi}{\lambda},$$

где φ – угол дифракции.

Так как $\sin \varphi$ не может быть больше единицы, то m не может быть больше величины d/λ.

Таким образом,

$$m \leq d/\lambda.$$

Подставив значения величин, получим

$$m \leq 2/0{,}555 = 3{,}6.$$

Порядок дифракционного максимума является целым числом, поэтому $m_{max} = 3$.

Ответ: $\boldsymbol{m_{max} = 3}$.

Задача 4. При каком минимальном числе штрихов дифракционной решетки N_{min} с периодом $d = 2{,}90$ мкм можно разделить компоненты дублета желтой линии натрия $\lambda_1 = 589{,}0$ нм и $\lambda_2 = 589{,}6$ нм?

Дано:
$d = 2{,}90 \cdot 10^{-6}$ м;
$\lambda_1 = 589{,}0 \cdot 10^{-9}$ м;
$\lambda_2 = 589{,}6 \cdot 10^{-9}$ м

Найти: $N_{\min}$.

Решение. Число штрихов N решетки связано с ее разрешающей способностью R соотношением

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN. \qquad (1.11)$$

Откуда следует, что $N = R / m$.

Таким образом, $N_{\min}$ соответствует максимальное число m:

$$N_{\min} = \frac{R}{m_{\max}}. \qquad (1.12)$$

Величину максимального порядка спектра $m_{\max}$ найдем из условия главных максимумов для дифракционной решетки

$$d\sin\varphi = m\lambda,$$

$$m = \frac{d\sin\varphi}{\lambda}. \qquad (1.13)$$

Величина $m_{\max}$ определяется из выражения (1.13) с учетом того, что $\sin\varphi = 1$ и $\lambda = \lambda_2$, что соответствует $\varphi_2 > \varphi_1$.

Тогда

$$m_{\max} = \frac{d}{\lambda_2} = \frac{d}{\lambda_1},$$

$$m_{\max} = \frac{2{,}90 \cdot 10^{-6}}{589{,}6 \cdot 10^{-9}} = 4{,}9.$$

Так как порядок спектра может быть только целым числом, то $m_{\max} = 4$.

Из отношения (1.11) находим

$$R_{\min} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

Подставляем последнее выражение в формулу (1.12), определим минимальное число штрихов дифракционной решетки:

$$N_{\min} = \frac{\lambda_1}{m_{\max}\left(\lambda_2 - \lambda_1\right)}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$N_{\min} = \frac{589}{4 \cdot 0{,}6} \approx 245{,}4.$$

Ответ: $N_{\min} \approx 250$.

ЗАДАЧИ

4 балла

1.88 Получите формулу радиуса зон Френеля для плоской монохроматической волны, длина волны которой λ.
Ответ: $r_m = \sqrt{bm\lambda}$.

1.89 Найдите радиусы первых пяти зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1,0 м. Длина волны λ = 500,0 нм.
Ответ: $r_1 = 7{,}1 \cdot 10^{-4}$ м; $r_2 = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м; $r_3 = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ м; $r_4 = 1{,}4 \cdot 10^{-3}$ м; $r_5 = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ м.

1.90 Определите радиус третьей зоны Френеля r_3 для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1,50 м. Длина волны λ = 600 нм.
Ответ: $r_3 = 1{,}64 \cdot 10^{-3}$ м.

1.91 Найдите радиусы первых трех зон Френеля для сферической волны, если расстояние от источника света до волновой по-

верхности равно 1,0 м, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения также равно 1,0 м. Длина волны $\lambda = 500$ нм.
Ответ: $\boldsymbol{r_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-4}}$ **м;** $\boldsymbol{r_2 = 7{,}1 \cdot 10^{-4}}$ **м;** $\boldsymbol{r_3 = 8{,}6 \cdot 10^{-4}}$ **м.**

1.92 Дифракционная картина наблюдается на расстоянии 4,0 м от точечного источника монохроматического света, длина волны которого $\lambda = 500$ 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?
Ответ: $\boldsymbol{R = 1{,}0 \cdot 10^{-3}}$ **м.**

1.93 На пластинку с щелью, ширина которой $a = 0{,}050$ мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0{,}70$ мкм. Определите угол φ отклонения лучей, соответствующий первому дифракционному минимуму.
Ответ: $\boldsymbol{\varphi = 7{,}0 \cdot 10^{-3}}$ **рад = 24'4".**

1.94 На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Угол отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному минимуму, $\varphi = 20°$. Определите ширину щели a.
Ответ: $\boldsymbol{a = 4{,}4 \cdot 10^{-6}}$ **м.**

1.95 Почему при получении спектра с помощью дифракционной решетки наименьшее отклонение испытывают фиолетовые лучи, а при получении спектра с помощью призмы наименьшее отклонение испытывают красные лучи?

1.96 Дифракционная решетка освещена нормально падающим монохроматическим светом. Спектр третьего порядка наблюдается при угле дифракции $\varphi_1 = 30{,}0°$. Под каким углом дифракции φ_2 наблюдается спектр спектр четвертого порядка этого же света?
Ответ: $\boldsymbol{\varphi_2 = 41{,}81^{\circ}}$**.**

1.97 Расстояние между штрихами дифракционной решетки $d = 0{,}580$ мкм. Максимум какого наибольшего порядка m_{max} дает эта решетка?
Ответ: $m_{max} = 6$.

1.98 Свет падает нормально на дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на миллиметре длины решетки. Каков наибольший порядок главных максимумов m_{max}, если длина волны света $\lambda = 520$ нм?
Ответ: $m_{max} = 3$.

5–6 баллов

1.99 Покажите, что за круглым экраном C в точке B, лежащей на линии, соединяющей точечный источник S с центром экрана C (рис. 1.32), будет наблюдаться светлое пятно. Размеры экрана принять достаточно малыми.

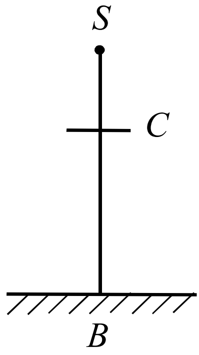


Рис. 1.32

1.100 Определите радиус четвертой зоны r_4 Френеля, если радиус второй зоны Френеля для плоского волнового фронта $r_2 = 2{,}00$ мм.
Ответ: $r_4 = 2{,}83$ мм.

1.101 На преграду с круглым отверстием падает плоская световая волна. Что будет происходить с интенсивностью дифракционной картины в центре экрана, если экран удалять от преграды? Ответ обоснуйте.

1.102 На диафрагму с круглым отверстием падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 600$ нм. На экране наблюдается дифракционная картина. При каком наибольшем расстоянии l между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины еще будет наблюдаться темное пятно? Диаметр отверстия 1,96 мм.
Ответ: $l = 0{,}80$ м.

1.103 На щель шириной a = 20,0 мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света, длина волны которого λ = 500 нм. Найти ширину A изображения щели на экране, удаленном от щели на l = 1,0 м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.
Ответ: $A = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ м.

1.104 На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия, длина волны которой λ_1 = 630,0 нм, видна в спектре третьего порядка под углом φ = 60°. Какая спектральная линия λ_2 видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? Какое число штрихов N на 1,0 мм длины имеет дифракционная решетка?
Ответ: λ_2 = 472,5 нм; N = 458 мм$^{-1}$.

1.105 На дифракционную решетку падает нормально пучок света. Для того чтобы увидеть красную линию с длиной волны λ = 700 нм в спектре второго порядка, зрительную трубу пришлось установить под углом φ = 30° к оси коллиматора. Найдите постоянную d дифракционной решетки. Какое число штрихов N нанесено на единицу длины этой решетки?
Ответ: $d = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ м; N = 3570 см$^{-1}$.

1.106 Постоянная дифракционной решетки в n = 4 раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определите угол α между двумя первыми главными симметричными дифракционными максимумами.
Ответ: α = 28°58'.

1.107 На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядков частично накладываются друг на друга. На какую длину волны λ_1 в спектре четвертого порядка накладывается длина волны λ_2 = 780 нм спектра третьего порядка?
Ответ: λ_1 = 585 нм.

1.108 Как изменится вид дифракционного спектра, если источник белого света, дифракционную решетку, экран и линзу, расположенную между дифракционной решеткой и экраном (не изменяя расстояний между ними), переместить из воздуха в воду? Почему?

Ответ: четкого дифракционного спектра на экране наблюдаться не будет.

1.109 На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1,0 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0{,}60$ мкм. Найдите общее число N дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определите угол φ дифракции, соответствующий последнему максимуму.

Ответ: $\boldsymbol{N = 9}$**;** $\boldsymbol{\varphi = 73{,}8°}$**.**

1.110 Узкий параллельный пучок рентгеновского излучения с длиной волны 245 пм падает на грань монокристалла каменной соли. Определите расстояние d между атомными плоскостями кристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается при падении излучения под углом скольжения $\theta = 61°$.

Ответ: $\boldsymbol{d = 2{,}8 \cdot 10^{-10}}$ **м.**

1.111 Чему равна постоянная дифракционной решетки d, если эта решетка может разрешить в первом порядке линии спектра калия $\lambda_1 = 404{,}4$ нм и $\lambda_2 = 404{,}7$ нм? Длина решетки 3,0 см.

Ответ: $\boldsymbol{d = 2 \cdot 10^{-5}}$ **м**.

7–8 баллов

1.112 На преграду с круглым отверстием радиуса $r = 1{,}20$ мм нормально падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda_1 = 0{,}60$ мкм. Определите максимальное расстояние L от отверстия до экрана, где еще можно наблюдать наиболее темное пятно.

Ответ: $\boldsymbol{L = 1{,}2}$ **м**.

1.113 Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света с длиной волны λ = 600 нм. На расстоянии 0,5l от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром 1,0 мм. Чему равно расстояние l, если преграда закрывает только центральную зону Френеля?
Ответ: l = 16,7 м.

1.114 На дифракционную решетку с периодом d = 2,00 мкм падает нормально свет с длиной волны λ = 500 нм. За решеткой расположена собирающая линза с фокусным расстоянием F = 50,00 см. Где нужно разместить экран, чтобы получить на нем четкую дифракционную картину? Каково расстояние S на экране между максимумом третьего порядка и центральным максимумом?
Ответ: S = 0,57 м.

1.115 На дифракционную решетку с периодом 4,0 мкм падает нормально свет, пропущенный через светофильтр. Полоса пропускания светофильтра от 500 нм до 550 нм. Будут ли спектры разных порядков перекрываться друг с другом? Почему?
Ответ: не будут.

1.116 На дифракционную решетку с периодом d = 14,0 мкм падает нормально монохроматическая световая волна. При этом расстояние s на экране между максимумами второго и третьего порядка равно 8,70 см. Какова длина волны λ падающего света, если расстояние от решетки до экрана L = 2,0 м?
Ответ: λ = 610 нм.

1.117 На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Чему должна быть равна постоянная дифракционной решетки, чтобы в направлении $\varphi = 41°$ совпадали максимумы двух линий: λ_1 = 656,0 нм и λ_2 = 410,0 нм?
Ответ: $d = 8{,}0 \cdot 10^{-6}$ м.

1.118 На дифракционную решетку, содержащую n = 100 штрихов на 1,0 мм, нормально падает монохроматический свет. Зри-

тельная труба спектрометра наведена на максимум второго порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол $\Delta\varphi = 16°$. Определите длину волны λ света, падающего на решетку.
Ответ: λ = 696 нм.

1.119 Определите постоянную дифракционной решетки, если она в первом порядке разрешает две спектральные линии калия $\lambda_1 = 578{,}0$ нм и $\lambda_2 = 580{,}0$ нм. Длина решетки 1,0 см.
Ответ: *d* = 35 мкм.

1.120 Определите длину волны λ, для которой дифракционная решетка с постоянной $d = 3{,}0$ мкм в спектре второго порядка имеет угловую дисперсию $D = 7{,}0 \cdot 10^5$ рад/м.
Ответ: λ = 460 нм.

9–10 баллов

1.121 Плоская монохроматическая волна, длина волны которой $\lambda = 0{,}540$ мкм падает на тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием $F = 50{,}0$ см. Вплотную за линзой расположена плоская диафрагма с круглым отверстием. За диафрагмой на расстоянии $S = 75{,}0$ см от нее находится экран. При каких радиусах отверстия r в центре дифракционной картины будет максимум освещенности?
Ответ: $\boldsymbol{r = \sqrt{m\lambda dF / \left(S - F\right)}}$ **при $m = 1$; $r = 9{,}0 \cdot 10^{-4}$ м.**

1.122 Между точечным источником света и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого r можно менять. Расстояния от диафрагмы до источника и экрана соответственно равны $a = 100{,}0$ см, $b = 125{,}0$ см. Определите длину волны света, если максимум освещенности в центре дифракционной картины на экране наблюдается при $r_1 = 1{,}00$ мм, а следующий максимум – при $r_2 = 1{,}29$ мм.
Ответ: $\lambda = 6{,}0 \cdot 10^{-7}$ м.

1.123 Радиусы окружностей, разграничивающих непрозрачные и прозрачные кольца амплитудной зонной пластинки, имеют значения $r_m = \sqrt{\mathrm{m}}$ мм (m = 1, 2, 3, …). Определите основное фокусное расстояние b пластинки для длин волн λ_1 = 400 нм, λ_2 = 580 нм, λ_3 = 760 нм. Основным фокусным расстоянием называется расстояние, соответствующее максимуму с m = 1.

Ответ: $\boldsymbol{F = r_m^2/\lambda}$**;** $\boldsymbol{F_1}$ **= 2,50 м;** $\boldsymbol{F_2}$ **= 1,72 м;** $\boldsymbol{F_3}$ **= 1,32 м.**

1.124 Свет, имеющий длину волны λ, падает наклонно на дифракционную решетку с периодом d. Угол падения равен α. Какой вид имеет в этом случае условие главных максимумов для дифракционной решетки?

Ответ: $\boldsymbol{d(\sin\varphi - \sin\alpha) = m\lambda}$**.**

1.125 Дифракционная решетка длиной L = 5,0 мм может разрешать в первом порядке две спектральные линии натрия λ_1 = 589,0 нм, λ_2 = 589,9 нм. Определите угол, под которым будет наблюдаться линия с λ_3 = 600,0 нм в спектре третьего порядка. Свет падает на решетку нормально.

Ответ: $\boldsymbol{\varphi = 20°42'}$.

1.126 Свет падает на дифракционную решетку нормально. Получите выражение для угловой дисперсии D решетки в зависимости от длины волны λ.

Ответ: $\boldsymbol{D = \dfrac{m}{\sqrt{d^2 - m^2\lambda^2}}}$.

1.127 Покажите, что для данной длины волны λ максимальная разрешающая способность дифракционных решеток, имеющих разные периоды, но одинаковую длину l, имеет одно и то же значение.

Ответ: $\boldsymbol{R_{\max} = l/\lambda}$**.**

1.4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ

Краткие теоретические сведения

Видимый свет – это электромагнитные волны в диапазоне длин волн от 400 нм до 760 нм. В электромагнитной волне колебания векторов напряженностей электрического поля $\vec{E}$ и магнитного поля $\vec{H}$ происходят перпендикулярно направлению распространения волны.

Естественным называется свет, в котором ни одно из направлений колебаний вектора напряженности $\vec{E}$ электрического поля не является преимущественным (рис. 1.33, *а*), при этом распределение светового вектора $\vec{E}$ по углам симметрично относительно направления распространения волны.

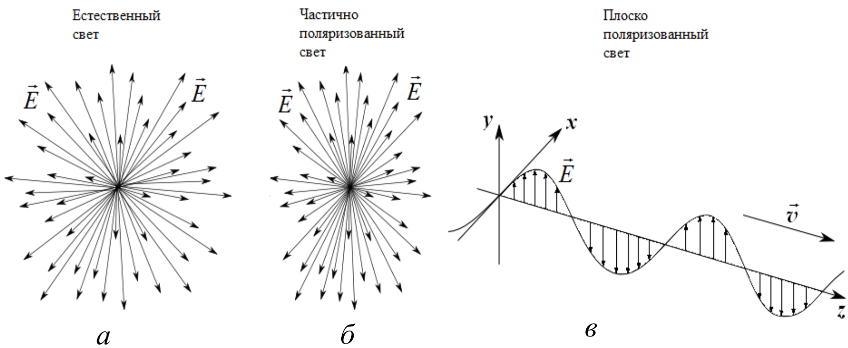


Рис. 1.33

Естественный свет испускается обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. д.).

Частично поляризованный свет – это свет, в котором распределение светового вектора $\vec{E}$ по углам относительно направления распространения волны несимметрично (рис. 1.33, *б*).

Поляризованным называется свет (рис. 1.33, *в*), в котором направления колебаний вектора $\vec{E}$ каким-либо образом упорядочены.

Плоскость, в которой колеблется вектор напряженности $\vec{E}$ электрического поля, называют **плоскостью колебаний**. Плоскость, в которой колеблется вектор напряженности $\vec{H}$ магнитного поля, называют **плоскостью поляризации**.

Основные виды поляризации (рис. 1.34):

линейная – колебания вектора $\vec{E}$ происходят в определенной плоскости (рис. 1.34, *а*);

круговая – конец вектора $\vec{E}$ описывает окружность в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны (рис. 1.34, *б*).

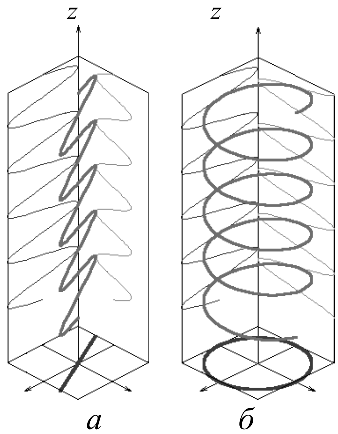


Рис. 1.34

эллиптическая – конец вектора $\vec{E}$ описывает эллипс в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны.

В зависимости от направления вращения вектора $\vec{E}$ круговая и эллиптическая поляризация бывает правой или левой.

Закон Малюса: интенсивность света I, прошедшего через поляризатор (анализатор), пропорциональна квадрату косинуса угла α между направлением колебаний вектора $\vec{E}$ и плоскостью поляризатора (анализатора):

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

где I_0 – интенсивность линейно поляризованного света, падающего на поляризатор или анализатор.

Закон Брюстера: при падении естественного света под углом $i_Б$ на границу раздела двух прозрачных диэлектриков и выпол-нении условия

$$\mathrm{tg}\, i_Б = n_{21},$$

отраженный луч будет полностью поляризован перпендикулярно плоскости падения, а преломленный луч частично поляризован в плоскости колебаний вектора $\vec{E}$.

В законе Брюстера $n_{21} = \dfrac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Угол поворота плоскости поляризации:
а) **для оптически активных кристаллов**

$$\varphi = \alpha d,$$

б) **для оптически активных растворов**

$$\varphi = [\alpha] c d,$$

где d – длина пути, пройденная светом в оптически активном веществе;

α, $[\alpha]$ – удельное вращение;

c – концентрация оптически активного вещества в растворе.

Пластинкой в четверть длины волны называется кристаллическая пластинка, вырезанная параллельно оптической оси, при прохождении через которую в направлении, перендикулярном оптической оси, обыкновенный и необыкновенный лучи, не изменяя своего направления, приобретают разность хода, равную $\lambda/4$.

Оптическая разность хода Δ для пластинки в четверть длины волны

$$\Delta = \left(n_o - n_e\right) d = \left(m + \frac{1}{4}\right)\lambda_0, \; m = 0, 1, 2, \ldots,$$

где λ_0 – длина волны света в вакууме;

n_o – показатель преломления обыкновенного луча;

n_e – показатель преломления необыкновенного луча;

d – толщина пластинки.

Поглощением света называется явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе, происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества.

Закон Бугера − Ламберта: интенсивность I плоской волны монохроматического света уменьшается при прохождении через поглощающую среду по экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-kx},$$

где I_0 – значения интенсивности света на входе в слой среды толщиной x;

k – коэффициент поглощения среды.

Закон Рэлея: интенсивность рассеянного света в мутных средах на частицах, размеры которых малы по сравнению с длиной волны λ, обратно пропорциональна четвертой степени длины волны λ

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}.$$

Излучение Вавилова − Черенкова возникает при движении заряженных частиц со скоростями v, бóльшими фазовой скорости света в данной среде. Излучение Вавилова – Черенкова распространяется по направлениям, составляющим острый угол Θ с траекторией движения частицы. Угол Θ определяется соотношением

$$\cos\Theta = \frac{c}{nv},$$

где n – показатель преломления среды, в которой движется заряженная частица.

Зависимость показателя преломления от частоты ω внешнего электрического поля

$$n^2 = \varepsilon = 1 + \sum_i \frac{N_{0i} e^2 / (m\varepsilon_0)}{\omega_{0i}^2 - \omega^2},$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

N_{0i} – концентрация электронов с собственной частотой ω_{0i};

m – масса электрона;

e – заряд электрона.

Примеры решения задач

Задача 1. Пучок естественного света падает на поверхность стеклянной пластины с показателем преломления n_2 = 1,5, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света образует угол $\varphi = 97^\circ$ с падающим пучком (рис. 1.35). Определите показатель преломления n_1 жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.

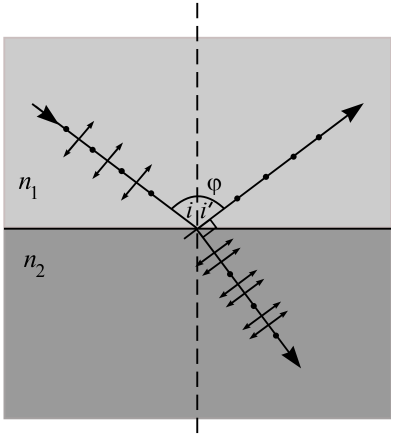


Рис. 1.35

Дано: n_2 = 1,5; φ = 97° **Найти**: n_1	**Решение:** Согласно закону Брюстера пучок света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован, если $$\mathrm{tg}\, i = n_{21},$$

где n_{21} – относительный показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости).

Так как

$$n_{21} = n_2 / n_1,$$

то

$$\mathrm{tg}\, i = n_2 / n_1.$$

Угол падения равен углу отражения, значит $i = \varphi/2$. Следовательно, $\mathrm{tg}\,(\varphi/2) = n_2 / n_1$. Откуда находим

$$n_1 = \frac{n_2}{\mathrm{tg}\,(\phi/2)}.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$n_1 = \frac{1{,}5}{\mathrm{tg}\,(97^{\circ}/2)} = \frac{1{,}5}{1{,}13} = 1{,}33.$$

Ответ: n_1 = 1,33.

Задача 2. Два николя N_1 и N_2 расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет $\alpha = 60°$ (рис. 1.36). Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность I_o естественного света: 1) при прохождении через один николь N_1; 2) при прохождении через оба николя. Потери интенсивности света на отражение и поглощение в каждом николе составляют в среднем 10 %.

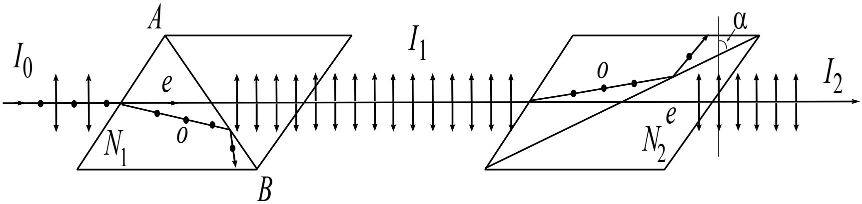


Рис. 1.36

Дано:
$\alpha = 60°$;
$k = 10\ \% = 0{,}1$

Найти: $\dfrac{I_0}{I_1}$, $\dfrac{I_0}{I_2}$

Решение. Естественный свет, падая на грань призмы Николя (рис. 1.36), расщепляется на два пучка: обыкновенный (*o*) и необыкновенный (*e*). Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний необыкновенного пучка лежит в плоскости чертежа.

Плоскость колебаний обыкновенного пучка перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный пучок света *o* испытывает полное отражение от границы *AB*, затем поглощается нижней зачерненной гранью. Необыкновенный пучок *e* проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения. Интенсивность света, прошедшего через призму (поляризатор),

$$I_1 = 1/2\, I_0\, (1-k).$$

Уменьшение интенсивности света при прохождении первого николя составляет

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2 I_0}{I_0\,(1-k)} = \frac{2}{1-k}, \qquad (1.14)$$

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2}{1-0{,}1} = 2{,}20.$$

Плоскополяризованный пучок света интенсивностью I_1 падает на второй николь N_2, расщепляется на два пучка: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный пучок испытывает полное отражение, полностью поглощается зачерненной оправой призмы. Интенсивность I_2 необыкновенного пучка, вышедшего из призмы N_2, определяется законом Малюса (без учета поглощения и отражения света во втором николе):

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

где α – угол между плоскостью колебаний в поляризованном пучке и плоскостью пропускания николя N_2.

Учитывая потери интенсивности на поглощение и отражение во втором николе, получаем

$$I_2 = I_1\,(1-k) \cos^2 \alpha.$$

Уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя равно:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1(1-k)\cos^2\alpha}.$$

Используя соотношение (1.14), получаем

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-k)^2\cos^2\alpha}.$$

Подставляя числовые данные, найдем

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0{,}1)^2\cos^2 60^\circ} = 9{,}87.$$

Ответ: 1) I_0/I_1 = 2,20; 2) I_0/I_2 = 9,87.

ЗАДАЧИ

4 балла

1.128 Угол падения i луча на поверхность стекла равен 60°. При этом отраженный пучок света оказывается максимально поляризованным. Определите угол r преломления луча.
Ответ: r **= 30°.**

1.129 Пучок естественного света падает из воздуха на поверхность жидкости. Угол преломления луча в жидкости $r = 35°$. Определите показатель преломления n жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.
Ответ: n **= 1,428.**

1.130 Параллельный пучок света переходит из глицерина ($n_{гл} = 1{,}47$) в стекло ($n_{ст} = 1{,}6$) так, что пучок, отраженный от границы

раздела этих сред, оказывается максимально поляризованным. Определите угол γ между падающим и преломленным пучками.
Ответ: $\boldsymbol{\gamma = 4{,}7°}$.

1.131 Пучок света, идущий в стеклянном сосуде с глицерином, отражается от дна сосуда. При каком угле падения i отраженный пучок света максимально поляризован? Показатель преломления стекла и глицерина составляют $n_{ст} = 1{,}6$ и $n_{гл} = 1{,}47$.
Ответ: $\boldsymbol{i = 47{,}36°}$.

1.132 Пучок света переходит из жидкости в стекло. Угол падения i пучка равен 60,0°, угол преломления $r = 50{,}0°$. При каком угле падения $i_в$ пучок света, отраженный от границы раздела этих сред, будет максимально поляризован?
Ответ: $\boldsymbol{i_в = 48{,}5°}$.

1.133 Пучок естественного света, интенсивность которого I_0, падает на призму Николя. Считая призму Николя идеальной, найдите интенсивность I плоскополяризованного света, прошедшего через призму.
Ответ: $\boldsymbol{I = I_0/2}$.

1.134 Найдите угол α между плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, проходящего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в 4 раза.
Ответ: $\boldsymbol{\alpha = 45°}$.

1.135 Плоскополяризованный свет, длина волны которого в вакууме $\lambda = 690$ нм, падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно его оптической оси. Принимая показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно $n_o = 1{,}66$ и $n_e = 1{,}49$, определите длины волн этих лучей в кристалле.
Ответ: $\boldsymbol{\lambda_o = 416}$ нм; $\boldsymbol{\lambda_e = 463}$ нм.

1.136 Параллельный пучок света падает нормально на пластинку из исландского шпата толщиной 50 мкм, вырезанную параллельно оптической оси. Принимая показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно $n_o = 1{,}66$ и $n_e = 1{,}49$, определите оптическую разность хода лучей, прошедших через пластинку.
Ответ: $\Delta = 8{,}5$ мкм.

1.137 Определите толщину кварцевой пластинки d, для которой угол поворота плоскости поляризации монохроматического света определенной длины волны $\varphi = 180°$. Удельное вращение в кварце для данной длины волны $\alpha = 0{,}52$ рад/мм.
Ответ: $d = 6{,}04$ мм.

1.138 Можно ли рассеяние света трактовать как дифракцию на мелких неоднородностях? Ответ обоснуйте.

5−6 баллов

1.139 Угол Брюстера $i_Б$ при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен 57°. Определить скорость света в этом кристалле.
Ответ: $v = 1{,}94 \cdot 10^8$ м/с.

1.140 При каком условии происходит полная поляризация луча, отраженного от поверхности прозрачного вещества? Определите угол падения i и преломления r при полной поляризации отраженного луча от поверхности глицерина. Показатель преломления глицерина $n = 1{,}47$.
Ответ: $i = 55°50'$; $r = 34°10'$.

1.141 Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества $i = 45°$. Найдите для этого вещества угол Брюстера $i_Б$ при падении света на границу раздела воздух – вещество.
Ответ: $i_Б = 54{,}7°$.

1.142 Доказать, что при падении света на границу раздела двух сред под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

1.143 Предельный угол полного отражения для пучка света на границе кристалла каменной соли с воздухом равен 40,5°. Определите угол Брюстера $i_Б$ при падении света из воздуха на поверхность этого кристалла.
Ответ: $i_Б$ = 57,0°.

1.144 Свет, проходя через жидкость, налитую в стеклянный сосуд, отражается от дна, причем отраженный свет плоскополяризован при падении его на дно сосуда под углом 41,0°. Определите показатель преломления жидкости $n_ж$ и угол падения света i на дно сосуда, чтобы наблюдалось полное отражение. Показатель преломления стекла $n_{ст} = 1,6$.
Ответ: $n_ж = 1,73$; $i = 60°7'$.

1.145 Раствор глюкозы с концентрацией $c_1 = 0,210$ г/см^3, находящийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через раствор, на угол $\varphi_1 = 24°$. Определите концентрацию c_2 глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 18°$.
Ответ: c_2 = 157 кг/м^3.

1.146 Плоскополяризованный свет, длина волны которого в вакууме $\lambda = 530$ нм, падает на пластинку из кварца перпендикулярно его оптической оси. Определите показатели преломления кварца для обыкновенного (n_o) и необыкновенного (n_e) лучей, если длины волн этих лучей в кристалле соответственно равны $\lambda_0 = 344$ нм и $\lambda_e = 341$ нм.
Ответ: $n_0 = 1,54$; $n_e = 1,55$.

1.147 Кристаллическая пластинка из исландского шпата с наименьшей толщиной $d = 0,86$ мкм служит пластинкой в четверть длины волны для света с длиной волны $\lambda = 0,590$ мкм. Опре-

делите разность Δn показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.
Ответ: Δn = 0,171.

1.148 При прохождении в некотором веществе пути l интенсивность света уменьшается в два раза. Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении пути $3l$?
Ответ: N = 8.

7−8 баллов

1.149 Используя принцип Гюйгенса, постройте волновые поверхности и огибающие вторичных волн при нормальном падении плоской световой волны на поверхность пластины одноосного кристалла, оптическая ось которого перпендикулярна поверхности пластинки. Разберите случаи положительного и отрицательного кристаллов.

1.150 Угол i между плоскостями поляризатора и анализатора равен 50°. Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в $N = 8$ раз. Пренебрегая потерей света при отражении, определите коэффициент поглощения α света в поляроидах.
Ответ: α = 0,22.

1.151 Пучок естественного света последовательно проходит через два николя, плоскости которых образуют между собой угол $\alpha = 40°$. Принимая, что потери интенсивности света на отражение и поглощение в каждом николе составляют в среднем 15 %, найдите во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый николь.
Ответ: I_2/I_0 = 0,21.

1.152 Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их плоскостями равен α. Как поляризатор, так и анализатор поглощают и отражают 8,0 %

падающего на них света. Оказалось, что интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9,0 % интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найдите угол α.
Ответ: $\alpha = 70°54'$.

1.153 Естественный свет интенсивностью I_0 проходит через поляризатор и анализатор, угол между их плоскостями составляет α. После прохождения света через эту систему он падает на зеркало и, отразившись, проходит вновь через нее. Пренебрегая поглощением света, определите интенсивность I света после его обратного прохождения.

Ответ: $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^4 \alpha$.

1.154 Пластинку кварца толщиной d = 2,0 мм поместили между параллельными николями. При этом плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол $\varphi = 53°$. Найдите наименьшую толщину $d_{\min}$ пластинки, при которой поле зрения поляриметра будет совершенно темным.
Ответ: $d_{\min} = 3{,}4 \cdot 10^{-3}$ м.

1.155 Кварцевую пластинку поместили между скрещенными николями. При какой наименьшей толщине d_{min} кварцевой пластинки поле зрения между николями будет максимально просветлено? Постоянная вращения кварца равна 27 град/мм.
Ответ: $d_{min} = 6{,}7 \cdot 10^{-3}$ м.

1.156 При прохождении света через трубку длиной l_1 = 20,0 см, содержащую раствор сахара с концентрацией c_1 = 10,0 %, плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi_1 = 13{,}3°$. В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной l_2 = 15,0 см, плоскость поляризации повернулась на угол $\varphi_2 =$ $= 5{,}2°$. Определите концентрацию c_2 второго раствора.
Ответ: c_2 = 5,2 %.

1.157 Определите наименьшую толщину кристаллической пластинки в четверть длины волны $d_{\min}$ для длины волны

$\lambda = 530$ нм, если разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей для данной длины волны $n_e - n_0 = 0{,}010$.

Ответ: d_{min} = 1,33 мкм.

1.158 Пластинка кварца толщиной $d_1 = 2{,}0$ мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1 = 30°$. Определите толщину d_2 кварцевой пластинки, помещенной между параллельными николями, чтобы данный монохроматический свет гасился полностью.

Ответ: $d_2 = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ м.

1.159 В некоторой среде распространяется плоская монохроматическая волна. Коэффициент поглощения для этой среды $\alpha = 1{,}00$ м$^{-1}$. Определите процент уменьшения интенсивности света при прохождении пути: 1) 5,0 мм, 2) 1,0 м.

Ответ: 1) $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1 = 0{,}5\ \%$; 2) $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_2 = 63\ \%$.

1.160 Во сколько раз N интенсивность молекулярного рассеяния синего света с длиной волны $\lambda_с = 460$ нм превосходит интенсивность рассеянного красного света $\lambda_к = 650$ нм?

Ответ: N = 4.

1.161 Для целого ряда газообразных и жидких диэлектриков соотношение $n = \sqrt{\varepsilon}$ выполняется хорошо. Для многих других тел (например, для воды $n^2 = 1{,}75$; $\varepsilon = 81$) соотношение $n = \sqrt{\varepsilon}$ не выполняется. Что нужно учесть в уравнениях Максвелла, чтобы добиться выполнения соотношения $n = \sqrt{\varepsilon}$?

1.162 Пусть в прозрачной среде имеется только один сорт атомов и в каждом из них способен смещаться только один электрон. Запишите выражение для диэлектрической проницаемости ε для этого случая. Нарисуйте график зависимости n^2 от ω. Как ведет себя график при $\omega \to \omega_0$?

9−10 баллов

1.163 Два скрещенных поляризатора расположены на пути волны естественного света интенсивности I_e. Между ними помещают третий поляризатор. Как должна быть ориентирована его плоскость, чтобы интенсивность света, прошедшего через всю систему, была максимальной? Чему она равна?
Ответ: $\alpha = 45°$, $I_{max} = I_e/8$.

1.164 Возможна ли ситуация, когда падение световой волны на поверхность диэлектрика не сопровождается ее отражением?
Ответ: да, если волна плоскополяризованна и вектор $\vec{E}$ лежит в плоскости падения, а угол падения равен углу Брюстера.

1.165 Есть две пластинки толщины d_1 и d_2, изготовленные из стекла. Предложите способ определения коэффициента поглощения данного сорта стекла для некоторой длины волны λ, при котором не требуется знать коэффициент отражения света пластиками. Получите соответствующую расчетную формулу.
Ответ: $\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \cdot \ln \frac{I_1}{I_2}$.

1.166 Первая из пластинок предыдущей задачи пропускает 92,5 % света, а вторая – 88,2 %. Найдите коэффициент поглощения α света стеклом для данной длины волны. Толщина пластинок $d_1 = 2{,}16$ мм, $d_2 = 36{,}82$ мм.
Ответ: $\alpha = 1{,}37$ м$^{-1}$.

1.167 Какой наименьшей скоростью v должен обладать электрон, чтобы в среде с показателем преломления $n = 1{,}6$ возникло излучение Вавилова − Черенкова?
Ответ: $v = 1{,}8 \cdot 108$ м/с.

1.168 Найдите минимальный импульс $p_{\min}$ (в единицах МэВ/с) электрона, чтобы эффект Вавилова – Черенкова можно было наблюдать в воде.

Ответ: $p_{\min}$ = 0,583 МэВ/с.

1.169 Найдите максимальную скорость $v_{\max}$ вынужденных колебаний свободного электрона в поле солнечного излучения вблизи земной поверхности, где максимальное значение напряженности электрического поля $E_0 = 1{,}0 \cdot 10^3$ В/м. Полем солнечного излучения считать $E = E_0 \cos\omega t$ с длиной волны $\lambda = 550$ нм.

Ответ: $v_{\max} = 5{,}1 \cdot 10^{-2}$ м/с.

1.170 Электрон, на который действует квазиупругая сила kx и тормозящая сила γx, находится в поле электромагнитного излучения. Электрическая составляющая электромагнитной волны $E = E_0 \cos\omega t$. Пренебрегая действием магнитной составляющей, найдите уравнение движения электрона.

1.5. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Краткие теоретические сведения

Тепловое излучение – это электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии.

Поток излучения (тепловой поток излучения) – это энергия электромагнитных волн W, излучаемая в единицу времени со всей поверхности тела:

$$\Phi = \frac{W}{t} = P,$$

где t – время излучения;

P – мощность излучения.

Энергетической светимостью тела R_T называется величина, численно равная энергии электромагнитных волн, излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела по всем направлениям в интервале длин волн от 0 до ∞.

Поглощательной способностью тела $\alpha_{\lambda,T}$ называется величина, показывающая, какая доля энергии электромагнитных волн с длинами волн в вакууме от λ до $\lambda + d\lambda$, падающих на поверхность тела, поглощается телом:

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \leq 1.$$

Поглощательная способность $\alpha_{\lambda,T}$ зависит от длины волны, температуры, химического состава тела и состояния его поверхности.

Абсолютно черным телом (*) называется тело, которое полностью поглощает падающее на него излучение во всем спектральном интервале от 0 до ∞

$$\alpha_T^* = 1.$$

Спектр излучения абсолютно черного тела показан на рис. 1.37.

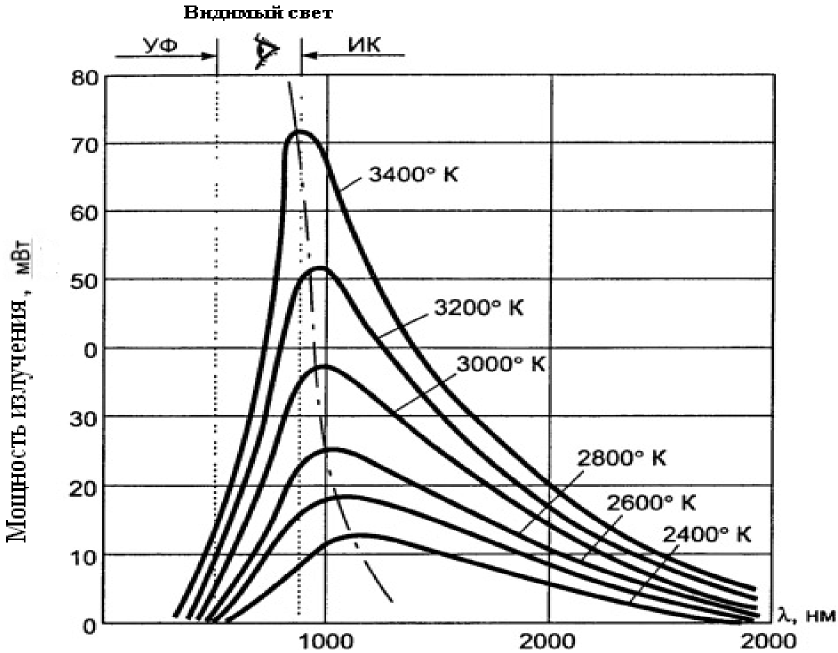


Рис. 1.37

Серым называется тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от длины волны света, направления его распространения и поляризации

$$\alpha_T^{\text{сер}} < 1.$$

Закон Стефана – Больцмана: энергетическая светимость R_T^* абсолютно черного тела пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени

$$R_T^* = \sigma T^4,$$

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

T – абсолютная температура тела.

Энергетическая светимость серого тела

$$R_T^{\text{сер}} = \alpha_T^{\text{сер}} \sigma T^4,$$

где $\alpha_T^{\text{сер}}$ – степень черноты.

Степень черноты $\alpha_T^{\text{сер}}$ (или **коэффициент излучения**) показывает отношение энергии теплового излучения серого тела к излучению абсолютно черного тела при той же температуре.

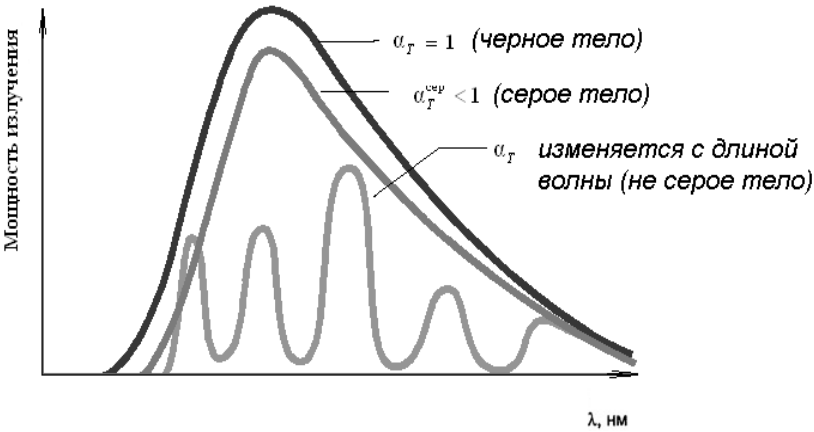


Рис. 1.38

Энергетическая светимость не серого тела

$$R_T = \alpha_{\lambda,T} \sigma T^4,$$

где $\alpha_{\lambda,T}$ – интегральная степень черноты не серого тела, то есть интегральная поглощательная способность (рис. 1.38).

Излучательной способностью, или **спектральной плотностью энергетической светимости тела,** называют величину $r_{\lambda,T}$, численно равную энергии теплового излучения тела dW, излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, отнесенной к величине интервала длин волн $d\lambda$:

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{d\lambda}.$$

Закон смещения Вина: длина волны λ_m (рис. 1.39), на которую приходится максимум излучательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре

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

где $b = 2{,}90 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина.

Закон Кирхгофа: отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности для всех тел одинаково, не зависит от природы тела и равно излучательной способности абсолютно черного тела при тех же значениях температуры и длины волны:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r^{*}_{\lambda,T}.$$

Связь энергетической светимости R_T и излучательной способности $r_{\lambda,T}$ тела

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

Энергия кванта электромагнитного излучения

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda_0},$$

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

λ_0 – длина волны излучения в вакууме;

c – скорость света в вакууме.

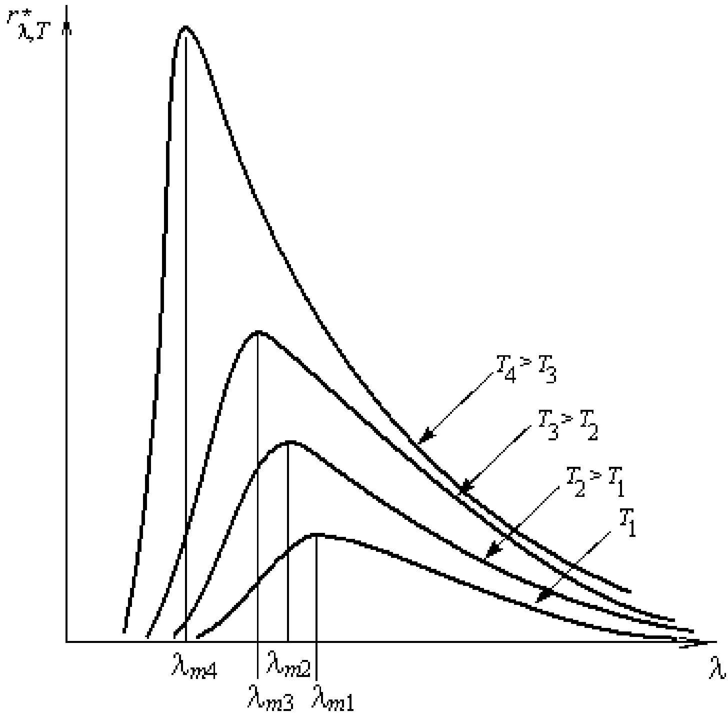


Рис. 1.39

Формула Планка для излучательной способности абсолютно черного тела

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

или

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/(kT\lambda)} - 1},$$

где $\nu = c/\lambda$ – частота излучения.

Связь радиационной температуры $T_р$ с истинной температурой T

$$T_р = \sqrt[4]{\alpha_T}\,T.$$

Зависимость максимальной испускательной способности от температуры

$$r_{\lambda,T\,\max} = CT^5,$$

где $C = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м^3 К^5 – постоянная.

Примеры решения задач

Задача 1. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, 0,580 мкм. Определите энергетическую светимость R_T^* абсолютно черного тела.

Дано:	**Решение.** Энергетическая светимость R_T^* абсолютно черного тела определяется законом Стефана–Больцмана:
$\lambda_m = 5{,}80 \cdot 10^{-7}$ м; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4); $b = 2{,}90 \cdot 10^{-3}$ м·К	$$R_T^* = \sigma T^4. \qquad (1.15)$$
Найти: R_T^*	

Температуру T абсолютно черного тела можно вычислить с помощью закона смещения Вина:

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

$$T = \frac{b}{\lambda_m}. \qquad (1.16)$$

Подставляя температуру T из выражения (1.16) в формулу, определяющую энергетическую светимость абсолютно черного тела (1.15), получим

$$R_T^* = \sigma b^4 / \lambda_m^4.$$

Произведем вычисления

$$R_T^* = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

Ответ: R_T^* = 3,54 · 10^7 Вт/м^2.

Задача 2. Максимум излучательной способности Солнца приходится на длину волны λ_m = 0,480 мкм. Определите температуру T Солнца, величину мощности P, излучаемой его поверхностью. Считать, что Солнце излучает как абсолютно черное тело. Радиус Солнца равен $R_с = 6,95 \cdot 10^8$ м.

Дано: $\lambda_m = 4,80 \cdot 10^{-7}$ м; $R_с = 6,95 \cdot 10^8$ м; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4); $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К **Найти**: T, P	**Решение:** согласно закону смещения Вина $$T = \frac{b}{\lambda_m}.$$ Мощность, излучаемая поверхностью Солнца, с учетом закона Стефана – Больцмана вычисляется как

$$P = R_T^* \cdot S = \sigma T^4 \cdot 4\pi R_c^2.$$

Произведем вычисления

$$T = 2,9 \cdot 10^{-3} / 480 \cdot 10^{-9} = 6,04 \cdot 10^3 \text{ К},$$

$$P = 5,67 \cdot 10^{-8} (6040)^4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (6,95 \cdot 10^8)^2 = 4,58 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

Ответ: T = 6,04 · 10^3 К; P = 4,58 · 10^{26} Вт.

Задача 3. Электрическая печь потребляет мощность $P = 500$ Вт. Температура ее внутренней поверхности при открытом небольшом отверстии диаметром $d = 5{,}0$ см равна 700 °С. Какая часть потребляемой мощности α рассеивается стенками?

Дано:	**Решение.**
$P = 500{,}0$ Вт; $d = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ м; $t = 700$ °С $= 973$ К; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4)	
Найти: α	

Решение. При установившемся тепловом режиме вся мощность P излучается наружу отверстием и стенками. Поэтому

$$P = \Phi_0 + \Phi_c, \qquad (1.17)$$

где Φ_0 и Φ_c – тепловые потоки излучения, испускаемые отверстием и стенками соответственно.

Часть мощности, рассеиваемая стенками

$$a = \frac{\Phi_c}{P}. \qquad (1.18)$$

Используя выражение (1.17), перезапишем формулу (1.18) в виде

$$\alpha = \frac{P - \Phi_0}{P} = 1 - \frac{\Phi_0}{P}. \qquad (1.19)$$

Излучение печи через отверстие рассматриваем как излучение абсолютно черного тела. Поэтому, используя закон Стефана – Больцмана, имеем

$$\Phi_0 = R_T^* S = \sigma T^4 \frac{\pi d^2}{4}.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (1.19), получим

$$\alpha = 1 - \frac{\pi d^2}{4} \frac{\sigma T^4}{P}.$$

Подставляя числовые данные, найдем результат

$$\alpha = 1 - \frac{3{,}14 \cdot \left(5{,}0 \cdot 10^{-2}\right)^2}{4} \frac{5{,}67 \cdot 10^{-8} (973)^4}{500{,}0} = 0{,}8.$$

Ответ: α = 0,8.

ЗАДАЧИ

4 балла

1.171 Участок поверхности нагретого тела, площадь которого ΔS, за время Δt в пределах телесного угла 2π излучает энергию ΔW. Найдите энергетическую светимость R_T этого участка.
Ответ: $R_T = \Delta W/(\Delta S \cdot \Delta t)$.

1.172 Имеется два одинаковых алюминиевых чайника, в которых до одной и той же температуры нагрето одинаковое количество воды. Один чайник закопчен, а другой чистый. Объясните, какой из чайников остынет быстрее и почему.

1.173 Из смотрового окошечка печи исходит поток излучения величиной Φ = 4,0 кДж/мин. Определите температуру T печи, если площадь окошечка S = 8,0 см^2. Считать, что окошко излучает как абсолютно черное тело.
Ответ: T = 1,1 · 10^3 К.

1.174 Вычислите энергию E, излучаемую за время t = 1,0 мин с площади S = 1,0 см^2 абсолютно черного тела, температура которого T = 1000 К.
Ответ: E = 340 Дж.

1.175 Мощность излучения абсолютно черного тела равна 34,0 кВт. Найдите температуру этого тела, если известно, что площадь его поверхности равна 0,60 м^2.

Ответ: $T = 1{,}0 \cdot 10^3$ К.

1.176 Поток излучения абсолютно черного тела $\Phi = 10{,}0$ кВт. Максимум энергии излучения приходится на длину волны $\lambda_m = 0{,}800$ мкм. Определите площадь S излучающей поверхности.

Ответ: $S = 1{,}02 \cdot 10^{-3}$ м^2.

5–6 баллов

1.177 Средняя энергетическая светимость R_T поверхности Земли равна 0,540 Дж/(см^2·мин). Какова температура T поверхности Земли, если условно считать, что она излучает как серое тело, для которого интегральная степень черноты не серого тела $\alpha_{\lambda,т} = 0{,}25$?

Ответ: $T = 282{,}3$ К.

1.178 Муфельная печь, потребляющая мощность $P = 1{,}0$ кВт, имеет отверстие площадью $S = 100{,}0$ см^2. Определите долю η мощности, рассеиваемой стенками печи, если температура ее внутренней поверхности равна 1,0 кК.

Ответ: $\eta = 0{,}57$.

1.179 Определите относительное увеличение $\dfrac{\Delta R_T^*}{R_T^*}$ энергетической светимости абсолютно черного тела при увеличении его температуры на 2,0 %.

Ответ: $\dfrac{\Delta R_T^*}{R_T^*} = 8{,}2$ %.

1.180 Определите, во сколько раз необходимо уменьшить температуру абсолютно черного тела, чтобы его энергетическая светимость R_T^* ослабла в 16 раз.

Ответ: в 2 раза.

1.181 Определите температуру абсолютно черного тела, при которой оно излучало энергии в 10 раз больше, чем поглощало. Температура окружающей среды $t_0 = 23,0$ °С.
Ответ: $T = 527,0$ К.

1.182 Абсолютно черное тело имеет температуру $T_1 = 500,0$ К. Какова будет температура T_2 тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в $n = 5$ раз?
Ответ: $T_2 = 747,7$ К.

1.183 Какую энергетическую светимость имеет затвердевающий свинец? Интегральная поглощательная способность 0,6.
Ответ: $R_T = 4,4 \cdot 10^3$ Вт/м^2.

1.184 Будем считать, что Земля излучает как серое тело, имея температуру $T = 280,0$ К. Определите коэффициент серости Земли, если энергетическая светимость R_T ее поверхности равна 325,0 кДж/(см^2·ч).
Ответ: $\alpha_{\lambda,T} = 2,6 \cdot 10^{-1}$.

1.185 Вычислите температуру T раскаленной ленты, если радиационный пирометр показывает температуру $T_{рад} = 2,5$ кК. Считать, что интегральная поглощательная способность раскаленной ленты не зависит от длины волны и равна $a_T = 0,35$.
Ответ: $T = 3251$ К.

1.186 Определите температуру T и энергетическую светимость R_T^* абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны $\lambda_m = 600,0$ нм.
Ответ: $T = 483,3$ К; $R_T^* = 3,1 \cdot 10^7$ Вт/м^2.

1.187 Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра длиной волны 760 нм на фиолетовую границу с длиной волны 390 нм?
Ответ: увеличится в 16 раз.

1.188 Абсолютно черное тело имеет температуру $T_1 = 3{,}0$ кК. При остывании тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на $\Delta\lambda = 8{,}0$ мкм. Определите температуру T_2, до которой тело охладилось.

Ответ: $T_2 = 323{,}0$ К.

1.189 Энергетическая светимость абсолютно черного тела $R_T^* = 10{,}0$ кВт/м^2. Определите длину волны λ_m, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости этого тела.

Ответ: $\lambda_m = 4{,}47$ мкм.

1.190 Длина волны λ_m, соответствующая максимуму излучательной способности абсолютно черного тела $\lambda_m = 3{,}4$ мкм. Определите энергетическую светимость абсолютно черного тела.

Ответ: $R_T^* = 3{,}0$ кВт/м^2.

1.191 Определите, как и во сколько раз изменится мощность излучения абсолютно черного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с $\lambda_{m1} = 720$ нм до $\lambda_{m2} = 400$ нм.

Ответ: увеличится в 10,5 раза.

1.192 В каких областях спектра лежат длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если источником света служит: 1) спираль электрической лампочки, температура которой $T = 3000$ К; 2) поверхность Солнца с температурой $T = 6000$ К; 3) атомная бомба, в которой в момент взрыва температура около 10 млн градусов. Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

Ответ: 1) $\lambda_1 = 9{,}67 \cdot 10^{-7}$ м; 2) $\lambda_2 = 4{,}83 \cdot 10^{-7}$ м;
3) $\lambda_3 = 2{,}90 \cdot 10^{-8}$ м.

7−8 баллов

1.193 Излучательная способность некоторого нагретого тела $r_{\lambda,T} = r_0\, e^{-\alpha\lambda}$, где r_0 (Вт/м^3) и α (м$^{-1}$) – постоянные. Определите энергетическую светимость R_T тела.
Ответ: $\boldsymbol{R_T = r_0/\alpha}$**.**

1.194 Мощность излучения раскаленной металлической поверхности $P_1 = 0{,}67$ кВт. Температура поверхности $T = 2500$ К, площадь $S = 10{,}0$ см^2. Найдите величину мощности излучения P поверхности, если бы она была абсолютно черной. Найдите интегральную поглощательную способность поверхности для данной температуры.
Ответ: $\boldsymbol{P = 2{,}22}$ **кВт;** $\boldsymbol{\alpha_T = 0{,}30}$**.**

1.195 Мощность P излучения шара радиусом $R = 0{,}10$ м при постоянной температуре T равна 1,0 кВт. Найдите температуру T шара, считая его серым телом, для которого $a_T = 0{,}25$.
Ответ: $\boldsymbol{T = 866{,}0}$ **К.**

1.196 При увеличении температуры T абсолютно черного тела в два раза длина волны λ_m, на которую приходится максимум излучательной способности тела, уменьшилась на $\Delta\lambda = 400{,}0$ нм. Определите начальную T_1 и конечную T_2 температуры тела.
Ответ: $\boldsymbol{T_1 = 3625{,}0}$ **К;** $\boldsymbol{T_2 = 7250{,}0}$ **К.**

1.197 Имеются два абсолютно черных источника теплового излучения. Температура одного из них $T_1 = 2500{,}0$ К. Найдите температуру T_2 другого источника, если длина волны, отвечающая максимуму его излучательной способности, на $\Delta\lambda = 0{,}590$ мкм больше длины волны, соответствующей максимуму излучательной способности первого источника.
Ответ: $\boldsymbol{T_2 = 1657}$ **К.**

1.198 Принимая Солнце за абсолютно черное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны $\lambda_m = 500{,}0$ нм, определите: 1) температуру поверхности Солнца T; 2) величину энергии W, излучаемой Солнцем в виде электромагнитных волн за 10,0 мин; 3) массу m, теряемую Солнцем за это время за счет излучения.
Ответ: 1) $T = 5{,}8 \cdot 10^3$ К; 2) $W = 2{,}3 \cdot 10^{29}$ Дж;
3) $m = 2{,}6 \cdot 10^{12}$ кг.

1.199 Площадь, ограниченная графиком спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, при переходе от температуры T_1 к температуре T_2 увеличилась в 5 раз. Определите, как изменится при этом длина волны λ_m, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела.
Ответ: уменьшится в 1,49 раза.

1.200 В результате нагревания абсолютно черного тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с 2,70 мкм до 0,90 мкм. Определите, во сколько раз N увеличились: 1) энергетическая светимость тела; 2) максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела.
Ответ: 1) $N_1 = 81$ раз; 2) $N_2 = 243$ раза.

1.201 Определите, какая длина волны λ_m соответствует максимальной спектральной плотности энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{\max} = 1{,}30 \cdot 10^{11}$ (Вт/м^3).
Ответ: $\lambda_m = 1{,}83$ мкм.

1.202 В формуле Планка для излучательной способности абсолютно черного тела от переменных ν, T перейдите к переменным λ, T.

9−10 баллов

1.203 Полая камера, внутренняя полость которой имеет площадь $S = 2{,}0$ см^2, имеет небольшое отверстие площади $\sigma = 1{,}0$ мм^2. Внутренняя поверхность камеры незначительную часть света поглощает (коэффициент поглощения $a = 0{,}010$), а остальную часть рассеивает. Внутри полости создается равновесное излучение. Какая часть светового потока Ф, падающего на входное отверстие, выходит из него обратно?
Ответ: $\mathbf{\Phi_1/\Phi = [1 + 2(S - \sigma)/\sigma]^{-1} = 1/3}$.

1.204 Излучательная способность нагретого тела задается функцией вида

$$r_{\lambda,\mathrm{T}} = \begin{Bmatrix} 0, & \lambda < \lambda_1 \\ p, & \lambda_1 \le \lambda \le \lambda_2 \\ 0, & \lambda > \lambda_2 \end{Bmatrix},$$

где p (Вт/м^3) – постоянная величина. Найдите энергетическую светимость R_T тела.
Ответ: $\boldsymbol{R_T = p\,(\lambda_2 - \lambda_1)}$.

1.205 На сколько (Δm) уменьшится масса Солнца за год вследствие излучения? За какое время t масса Солнца уменьшится вдвое? Температура поверхности Солнца $T = 5800$ К, радиус $R_{\mathrm{C}} = 6{,}95 \cdot 10^8$ м. Считать излучение Солнца близким к излучению абсолютно черного тела и постоянным.
Ответ: $\boldsymbol{\Delta m = 1{,}4 \cdot 10^{17}}$ **кг;** $\boldsymbol{t = 7{,}1 \cdot 10^{12}}$ **лет.**

1.206 Считая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело с температурой T, определите плотность потока энергии j солнечного излучения на верхней границе земной атмосферы.

Ответ: $\boldsymbol{j = \dfrac{\sigma T^4 R_{\mathrm{c}}^2}{R_{\text{орб}}^2}}$.

1.207 Лампочка накаливания с вольфрамовой нитью включена в сеть напряжением $U = 220{,}0$ В. Ток, текущий через лампочку $I = 0{,}40$ А; диаметр вольфрамовой нити $d = 0{,}30$ мм;, длина нити l = 10,0 см. Найдите температуру нагретой нити T. Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела для данной температуры $k = 0{,}30$.

Ответ: T = 2289,0 К.

1.208 С помощью формулы Планка для излучательной способности абсолютно черного тела сформулировать критерий высокой и низкой температур и установить для этих температур их предельные значения. В чем заключаются особенности предельных выражений?

Ответ: для высоких температур излучательная способность имеет классический характер, а для низких – существенно квантовый.

2. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

2.1. ФОТОНЫ. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Краткие теоретические сведения

Фотон – квант электромагнитного излучения.

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = m_f c^2, \quad \hbar = h/2\pi,$$

где h − постоянная Планка;
ν – частота света;
$\omega = 2\pi\nu$ − циклическая частота света;
m_f − масса фотона;
c – скорость света.

Масса фотона

$$m_f = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

Масса покоя фотона равна нулю.

Импульс фотона

$$p_f = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Внешним фотоэффектом называется явление испускания веществом электронов под действием света.

Законы внешнего фотоэффекта (законы Столетова).

1. При неизменном спектральном составе света, падающего на катод, фототок насыщения пропорционален световому потоку.

2. Для данного вещества максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждого вещества существует красная граница внешнего фотоэффекта, то есть минимальная частота света $\nu_{кр}$ (максимальная длина волны $\lambda_{кр}$), при которой еще возможен фотоэффект.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{вых} + T_{max} = A_{вых} + \frac{mv_{max}^2}{2},$$

где $A_{вых}$ – работа выхода электрона с поверхности вещества;

T_{max} – максимальная кинетическая энергия вырванных электронов;

v_{max} – максимальная скорость фотоэлектронов.

Если энергия фотона $h\nu < E_0 = m_0c^2$, где $E_0 = m_0c^2$ – энергия покоя электрона, то

$$T_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2};$$

если энергия фотона $h\nu$ сравнима с $E_0 = m_0c^2$, то

$$T_{max} = E_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right).$$

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_{кр} = \frac{A_{вых}}{h}, \text{ или } \lambda_{кр} = \frac{hc}{A_{вых}}.$$

Давление монохроматического света на плоскую поверхность тела (при анизотропном распространении света)

$$p = \frac{n_c h\nu}{c}(1+\rho)\cos i,$$

где $n_с = n_0 c \cos i$ – число фотонов, падающих за 1 с на поверхность единичной площади;

i – угол падения света на поверхность тела;

n_0 – концентрация фотонов в пучке падающего света;

ρ – коэффициент отражения поверхности.

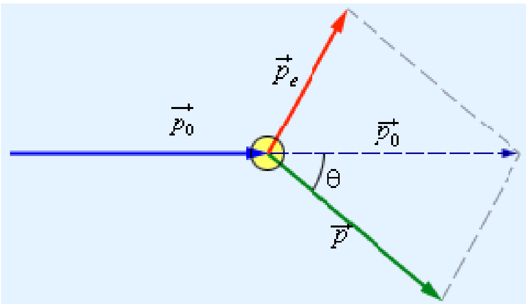
Давление света при изотропном распространении монохроматического света

$$p = \frac{w}{3},$$

где w – объемная плотность энергии излучения.

Эффект Комптона: изменение длины волны электромагнитного излучения при его рассеянии на слабосвязанных электронах вещества (рис. 2.1):

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2} = 2\lambda_к \sin^2\frac{\theta}{2},$$



$\vec{p}_о$ – вектор импульса фотона до взаимодействия;

$\vec{p}$ – вектор импульса фотона после взаимодействия;

$\vec{p}_е$ – вектор импульса электрона до взаимодействия

Рис. 2.1

где λ_1 и λ_2 – длины волн падающего и рассеянного излучения;

m_0 – масса покоя электрона;

θ – угол рассеяния;

$\lambda_к = 2{,}43 \cdot 10^{-12}$ м – комптоновская длина волны электрона.

Примеры решения задач

Задача 1. Найдите энергию ε, массу m_f и импульс p_f фотона, если длина волны фотона $\lambda = 1{,}60 \cdot 10^{-12}$ м.

Дано:
$\lambda = 1{,}60 \cdot 10^{-12}$ м;
$c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ м/с;
$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Найти: ε, m_f, p_f

Решение. Энергия, масса и импульс фотона определяются следующими соотношениями:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \qquad m_f = \frac{h}{c\lambda}, \qquad p_f = \frac{h}{\lambda}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$\varepsilon = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{1{,}6 \cdot 10^{-12}} = 1{,}24 \cdot 10^{-13}\,\text{Дж},$$

$$m_f = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^{8} 1{,}6 \cdot 10^{-12}} = 1{,}38 \cdot 10^{-30}\,\text{кг},$$

$$p_f = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}6 \cdot 10^{-12}} = 4{,}14 \cdot 10^{-22}\,\text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

Ответ. **$\varepsilon = 1{,}24 \cdot 10^{-13}$ Дж; $m_f = 1{,}38 \cdot 10^{-30}$ кг;**
$p_f = 4{,}14 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с.

Задача 2. Красная граница фотоэффекта для никеля $\lambda_{кр} = 257$ нм. Найдите длину волны света, вызывающего фотоэффект, если задерживающее напряжение $U_з = 1{,}50$ В.

Дано:
$\lambda_{кр} = 257 \cdot 10^{-9}$ м;
$U_з = 1{,}50$ В;
$c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ м/с;
$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Найти: λ

Решение. Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{вых} + \frac{mv_{max}^2}{2}. \qquad (2.1)$$

Работа выхода связана с красной границей фотоэффекта следующим образом:

$$A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}. \qquad (2.2)$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_{\text{з}}, \qquad (2.3)$$

где e – заряд электрона;

m – масса электрона.

Подставляя выражения (2.2), (2.3) в уравнение Эйнштейна (2.1), получим

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}} + eU_{\text{з}}. \qquad (2.4)$$

Из уравнения 26.4) найдем длину волны света

$$\lambda = \left(\frac{1}{\lambda_{\text{кр}}} + \frac{eU_{\text{з}}}{hc} \right)^{-1}.$$

Подставляем числовые данные и получаем

$$\lambda = \left(\frac{1}{257 \cdot 10^{-9}} + \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}50}{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}} \right)^{-1} = 1{,}96 \cdot 10^{-7}\,\text{м}.$$

Ответ. **$\lambda = 1{,}96 \cdot 10^{-7}$ м.**

Задача 3. Поток монохроматического излучения Ф = 0,50 Вт с длиной волны λ = 550,0 нм падает нормально на зеркальную поверхность. Определите силу давления F на поверхность, число фотонов $n_с$, ежесекундно падающих на поверхность.

Дано:	**Решение.** Сила светового давления на площадь S определяется как
$\Phi = 0{,}50$ Вт;	
$\lambda = 5{,}50 \cdot 10^{-7}$ м;	
$c = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ м/с;	$$F = pS.$$
$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
Найти: $F,\ n_с$	Световое давление

$$p = \frac{n_с h\nu}{c}\left(1+\rho\right),$$

где $n_с$ – число фотонов, падающих за 1 с на единицу площади поверхности.

Световой поток, падающий на поверхность:

$$\Phi = n_с h\nu = \frac{n_с hc}{\lambda}. \qquad (2.5)$$

Тогда сила светового давления

$$F = \frac{n_с h\nu}{c} S\left(\rho+1\right) = \frac{\Phi}{c}\left(\rho+1\right). \qquad (2.6)$$

Из выражения (2.5) находим

$$n_с = \frac{\Phi\lambda}{hc}. \qquad (2.7)$$

Поверхность зеркальная, следовательно, $\rho = 1$.

По формулам (2.6), (2.7) произведем вычисления:

$$F = \frac{0,50}{3,0 \cdot 10^8}\left(1+1\right) = 3,30 \cdot 10^{-9}\ \text{Н},$$

$$n_{\text{c}} = \frac{0,50 \cdot 5,50 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8} = 1,38 \cdot 10^{18}\ \text{с}^{-1}.$$

Ответ: $\boldsymbol{F = 3,30 \cdot 10^{-9}}$ **Н;** $\boldsymbol{n_{\text{c}} = 1,38 \cdot 10^{18}}$ **с**$\boldsymbol{^{-1}}$**.**

Задача 4. В результате комптоновского рассеяния фотона на почти свободном электроне фотон был рассеян на угол $\theta = 60°$. Энергия рассеянного фотона $\varepsilon_2 = 0,30$ МэВ. Определите энергию фотона ε_1 до рассеяния.

Дано:	**Решение.** Для определения энергии фотона до рассеяния воспользуемся формулой, описывающей комптоновское изменение длины волны:
$\theta = 60°$;	
$\varepsilon_2 = 0,30 \cdot 10^6$ эВ	
Найти: ε_1	

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{2h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2}, \qquad (2.8)$$

где λ_1 и λ_2 – длина волны фотона до и после рассеяния.

Воспользовавшись формулой

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

находим

$$\lambda_1 = \frac{hc}{\varepsilon_1}, \quad \lambda_2 = \frac{hc}{\varepsilon_2}. \qquad (2.9)$$

Подставляя выражения (2.9), в формулу (2.8), получим

$$\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} = \frac{2}{m_0 c^2}\sin^2\frac{\theta}{2}.$$

Откуда

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2 E_0}{E_0 - 2\varepsilon_2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}, \qquad (2.10)$$

где $E_0 = m_0 c^2 = 0{,}511$ МэВ – энергия покоя электрона.

Вычисляя по формуле (2.10), находим

$$\varepsilon_1 = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}511}{0{,}511 - 2 \cdot 0{,}3 \sin^2 30^\circ} = 0{,}425 \text{ МэВ.}$$

Ответ. ε_1 = 0,425 МэВ.

ЗАДАЧИ

4 балла

2.1 На поверхность калия падает свет с длиной волны $\lambda = 150{,}0$ нм. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов T_{max}.
Ответ: T_{max} = 6,1 эВ.

2.2 На металлическую пластину направлен монохроматический пучок света с частотой $\nu = 7{,}3 \cdot 10^{14}$ Гц. Красная граница фотоэффекта для данного материала $\lambda_{кр} = 560{,}0$ нм. Определите максимальную скорость v_{max} фотоэлектронов.
Ответ: $v_{max} = 5{,}3 \cdot 10^5$ м/с.

2.3 Красная граница фотоэффекта для цинка $\lambda_{кр} = 310{,}0$ нм. Определите максимальную кинетическую энергию T_{max} фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падает свет с длиной волны $\lambda = 200{,}0$ нм.
Ответ: T_{max} = 2,2 эВ.

2.4 Красная граница фотоэффекта для некоторого металла $\lambda_{кр} = 275{,}0$ нм. Найдите работу выхода $A_{вых}$ электрона из металла, максимальную скорость фотоэлектронов v_{max}, если на металл падает свет с длиной волны $\lambda = 180{,}0$ нм.
Ответ: $\mathbf{A_{вых} = 7{,}2 \cdot 10^{-19}}$ **Дж;** $\mathbf{v_{max} = 9{,}0 \cdot 10^{5}}$ **м/с.**

2.5 Для калия красная граница фотоэффекта $\lambda_{кр} = 0{,}620$ мкм. Какую максимальную скорость v_{max} могут иметь фотоэлектроны, вылетающие при облучении калия светом с длиной волны $\lambda = 0{,}420$ мкм?
Ответ: $\mathbf{v_{max} = 5{,}8 \cdot 10^{5}}$ **м/с**.

2.6 На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны $\lambda = 200{,}0$ нм. Найдите наименьшее значение задерживающего напряжения $U_з$, которое нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.
Ответ: $\mathbf{U_з = 3{,}9}$ **В.**

2.7 На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов $U_з = 1{,}50$ В. Определите длину волны λ света, падающего на пластину.
Ответ: $\mathbf{\lambda = 2{,}26 \cdot 10^{-7}}$ **м.**

2.8 На пластину падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0{,}420$ мкм. Фототок прекращается при задерживающем напряжении $U_з = 0{,}950$ В. Определите работу выхода $A_{вых}$ электронов с поверхности пластины.
Ответ: $\mathbf{A_{вых} = 2{,}0}$ **эВ**.

2.9 Работа выхода электронов у оксида меди $A_{вых} = 5{,}15$ эВ. Вызовет ли фотоэффект ультрафиолетовое излучение с длиной волны $\lambda = 300{,}0$ нм? Почему?
Ответ: нет.

2.10 Определите энергию ε, массу m_f и импульс фотона p_f, длина волны которого $\lambda = 380{,}0$ нм.
Ответ: $\varepsilon = 3{,}27$ эВ; $m = 5{,}80 \cdot 10^{-36}$ кг; $p = 1{,}74 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.

2.11 Какую энергию ε должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?
Ответ: $\varepsilon = 510$ кэВ.

2.12 Определить длину волны фотона λ, импульс которого равен импульсу электрона, прошедшего ускоряющее напряжение $U = 9{,}80$ В.
Ответ: $\lambda = 3{,}92 \cdot 10^{-7}$ м.

2.13 Определите энергетическую освещенность E_e зеркальной поверхности, если давление P, производимое облучением, равно 40,0 мкПа. Излучение падает на поверхность нормально.
Ответ: $E_e = 6{,}0 \cdot 10^3$ Вт/м^2.

2.14 На идеальную отражающую поверхность площадью $S = 5{,}0$ см^2 за время $t = 3{,}0$ мин нормально падает монохроматический свет, энергия которого равна 9,0 Дж. Определите давление p, оказываемое светом на поверхность.
Ответ: $p = 6{,}67 \cdot 10^{-7}$ Па.

2.15 Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 20{,}0$ пм испытывают комптоновское рассеяние под углом $\theta = 90°$. Найдите изменение длины волны $\Delta\lambda$ при рассеянии, энергию T_e и импульс p_e электрона отдачи.
Ответ: $\Delta\lambda = 2{,}42$ пм; $T_e = 6{,}60$ кэВ; $p_e = 4{,}40 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с.

5−6 баллов

2.16 На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda = 0{,}250$ мкм. Фототок прекращается при минимальном задерживающем напряже-

нии $U_з$ = 0,96 В. Определить работу выхода $A_{вых}$ электронов из металла.
Ответ: $A_{вых}$ = 4,01 эВ.

2.17 Красная граница фотоэффекта для некоторого металла $\nu_{кр} = 6{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц. При каких частотах ν падающего света вылетающие электроны полностью задерживаются запирающим напряжением $U_з$ = 3,0 В?
Ответ: $\nu < 1{,}3 \cdot 10^{15}$ Гц.

2.18 При освещении поверхности некоторого металла светом с длиной волны λ_1 = 400,0 нм выбитые фотоэлектроны полностью задерживаются напряжением $U_{з1}$ = 2,0 В. Найдите задерживающее напряжение $U_{з2}$ при освещении того же металла светом с длиной волны λ_2 = 770,0 нм.
Ответ: $U_{з2}$ = 0,51 В.

2.19 Работа выхода электронов из кадмия равна $A_{вых}$ = 4,08 эВ. Какой должна быть длина волны излучения λ, падающего на кадмий, чтобы при фотоэффекте максимальная скорость фотоэлектронов была равна $v_{max} = 2{,}0 \cdot 10^6$ м/с?
Ответ: $\lambda = 8{,}0 \cdot 10^{-6}$ м.

2.20 Какова должна быть длина волны γ-излучения, падающего на платиновую пластину, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была v_{max} = 3,0 Мм/с?
Ответ: $\lambda = 3{,}9 \cdot 10^{-8}$ м.

2.21 На цинковую пластину падает пучок ультрафиолетового излучения с длиной волны λ = 0,20 мкм. Определите максимальную кинетическую энергию T_{max} и максимальную скорость v_{max} фотоэлектронов.
Ответ: T_{max} = 2,20 эВ; $v_{max} = 8{,}83 \cdot 10^5$ м/с.

2.22 На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны λ = 0,10 мкм. Красная граница фотоэффекта $\lambda_{кр}$ = 0,30 мкм. Какая доля энергии фотона η расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?
Ответ: η = 0,67.

2.23 Изобразите зависимость максимальной кинетической энергии $T_{\max}$ фотоэлектрона от частоты света ν. Работа выхода электрона из металла равна $A_{\text{вых}}$.

2.24 Изобразите зависимость фототока насыщения от величины модуля напряженности электрического поля E в падающей световой волне.

2.25 Определите длину волны λ, массу m_f и импульс p_f фотона с энергией ε = 1,0 МэВ. Сравните массу этого фотона m_f с массой покоящегося электрона m_e.
Ответ: $\boldsymbol{\lambda = 1{,}2 \cdot 10^{-9}}$ **м;** $\boldsymbol{m_f = 1{,}8 \cdot 10^{-30}}$ **кг;**
$\boldsymbol{p_f = 5{,}3 \cdot 10^{-22}}$ **кг·м/с;** $\boldsymbol{m_f = 2\, m_e}$.

2.26 Определите абсолютный показатель преломления среды n, в которой свет с энергией кванта $\varepsilon = 4{,}4\cdot 10^{-19}$ Дж имеет длину волны $\lambda = 3{,}0\cdot 10^{-7}$ м.
Ответ: $\boldsymbol{n = 1{,}5}$.

2.27 С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны λ = 520,0 нм?
Ответ: $\boldsymbol{v = 9{,}2 \cdot 10^5}$ **м/с.**

2.28 С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны λ = 520,0 нм?
Ответ: $\boldsymbol{v = 1{,}4 \cdot 10^3}$ **м/с.**

2.29 Давление монохроматического света с длиной волны λ = 500,0 нм на зачерненную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно 0,12 мкПа. Определите число фотонов $n_{\text{с}}$, падающих ежесекундно на 1,0 м^2 поверхности.
Ответ: $\boldsymbol{n_{\text{с}} = 9{,}05 \cdot 10^{19}}$.

2.30 Определите давление света p на стенки электрической 100-ваттной лампочки. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение и стенки лампочки отражают 15 % падающего на них света. Колба лампочки представляет собой сферу радиусом $r = 5{,}0$ см.
Ответ: $\boldsymbol{p = 1{,}2 \cdot 10^{-5}}$ **Па**.

2.31 Волны электромагнитного излучения каких длин характерны для: а) фотоэффекта; б) эффекта Комптона? Произведите оценки.

2.32 Фотон с энергией $\varepsilon = 0{,}51$ МэВ был рассеян при эффекте Комптона на почти свободном электроне на угол $\theta = 180°$. Определите кинетическую энергию T электрона отдачи.
Ответ: $\boldsymbol{T = 0{,}34}$ **МэВ.**

7−8 баллов

2.33 При освещении вакуумного фотоэлемента светом с длиной волны $\lambda_1 = 600{,}0$ нм он заряжается до разности потенциалов $U_1 = 1{,}20$ В. До какой разности потенциалов U_2 зарядится фотоэлемент при освещении его светом с длиной волны $\lambda_2 = 400{,}0$ нм?
Ответ: $\boldsymbol{U_2 = 2{,}23}$ **В.**

2.34 Энергия фотонов, вызывающих фотоэффект с поверхности некоторого металла возросла на 2,0 эВ. На сколько при этом увеличилась максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов ΔT?
Ответ: $\boldsymbol{\Delta T = 2{,}0}$ **эВ**.

2.35 Работа выхода электронов у золота $A_{\text{вых}} = 4{,}59$ эВ. Определите поверхностный скачок потенциала $\Delta\varphi$ у золота.
Ответ: $\boldsymbol{\Delta\varphi = 4{,}59}$ **В**.

2.36 Найдите минимальную величину кванта энергии ε_{min}, вызывающего фотоэффект, если при освещении фотокатода светом, энергия кванта которого равна ε = 5,0 эВ, электрон удаляется от поверхности катода на расстояние l = 1,0 см. Модуль напряженности задерживающего электрического поля E = 2,0 В/см.
Ответ: $\boldsymbol{\varepsilon_{min}}$ **= 2,0 эВ**.

2.37 Плоский алюминиевый электрод освещается ультрафиолетовым светом с длиной волны λ = 83,0 нм. На какое минимальное расстояние l от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода есть задерживающее электрическое поле, модуль напряженности которого E = 7,5 В/см? Красная граница фотоэффекта для алюминия $\lambda_{кр}$ = 332,0 нм.
Ответ: $\boldsymbol{l = 1{,}5 \cdot 10^{-2}}$ **м**.

2.38 На катод фотоэлемента, находящегося в режиме насыщения, падает свет с длиной волны λ = 500,0 нм. Известно, что если на фотокатод падает излучение мощностью P =1,0 Вт, то сила тока насыщения $I_н$ = 5,0 мА. Найдите отношение η числа фотоэлектронов, вырываемых с поверхности фотокатода к числу фотонов, поглощаемых им за один и тот же промежуток времени Δt.
Ответ: $\boldsymbol{\eta = 1{,}2 \cdot 10^{-2}}$**.**

2.39 Ток насыщения, протекающий через вакуумный фотоэлемент при его освещении светом, $I_н$ = 0,50 нА. Определите число N фотоэлектронов, покидающих поверхность катода в единицу времени.
Ответ: $\boldsymbol{N = 3{,}1 \cdot 10^{-9}}$ **с**$^{\boldsymbol{-1}}$.

2.40 Луч лазера, излучающего свет на длине волны λ = 630,0 нм, имеет вид конуса с углом при вершине $\alpha = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ рад. Оптическая мощность излучения лазера P = 3,0 мВт. На каком минимальном расстоянии L наблюдатель сможет увидеть свет лазера, если глаз надежно регистрирует n = 100 фотонов в секунду? Диаметр зрачка d = 0,50 см. Рассеянием света пренебречь.
Ответ: $\boldsymbol{L = 5{,}0 \cdot 10^{11}}$ **м**.

2.41 Под каким напряжением U работает рентгеновская трубка, если самое «жесткое» излучение в ее спектре имеет длину волны $\lambda_{min} = 3{,}0 \cdot 10^{-11}$ м?
Ответ: $\boldsymbol{U} = 4{,}1 \cdot 10^4$ В.

2.42 Мощность точечного источника монохроматического света $P = 10{,}0$ Вт на длине волны $\lambda = 500{,}0$ нм. На каком минимальном расстоянии L человек заметит этот источник, если глаз реагирует на световой поток $n = 60$ фотонов в секунду? Принять диаметр зрачка $d = 0{,}50$ см. Поглощением света в воздухе пренебречь.
Ответ: $\boldsymbol{L} = 1{,}0 \cdot 10^6$ м.

2.43 Пучок электронов, прошедший область поля с ускоряющим напряжением $U = 50{,}0$ кВ, направлен на облако свободных электронов. Определите коротковолновую границу λ_{min} рентгеновского излучения, возникающего при торможении пучка.
Ответ: $\lambda_{min} = 5{,}0 \cdot 10^{-11}$ м.

2.44 Давление света, производимое на зеркальную поверхность, $p = 5{,}0$ мПа. Определите концентрацию n фотонов вблизи поверхности, если длина волны света, падающего на поверхность $\lambda = 0{,}50$ мкм.
Ответ: $\boldsymbol{n} = 6{,}3 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$.

2.45 Точечный источник монохроматического излучения с длиной волны излучения $\lambda = 1{,}0$ нм находится в центре сферической зачерненной колбы радиуса $R = 10{,}0$ см. Определите световое давление p, производимое светом на внутреннюю поверхность колбы, если мощность источника $P_1 = 1{,}0$ кВт.
Ответ: $\boldsymbol{p} = 2{,}7 \cdot 10^{-5}$ Па.

2.46 Фотон с энергией $\varepsilon_1 = 0{,}51$ МэВ при рассеянии на почти свободном электроне потерял половину своей энергии. Определите угол рассеяния θ.
Ответ: $\theta = 90°$.

2.47 Какая доля энергии фотона η приходится при эффекте Комптона на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол $\theta = \pi/2$? Энергия фотона до рассеяния $\varepsilon_1 = 0{,}51$ МэВ.
Ответ: $\eta = 0{,}50$.

9−10 баллов

2.48 При освещении катода светом вначале с длиной волны λ_1, а затем λ_2 обнаружили, что запирающее напряжение изменилось в n раз. Определите работу выхода $A_{вых}$ электрона из этого металла.

Ответ: $$A_{вых} = \frac{hc(n\lambda_1 - \lambda_2)}{(n-1)\lambda_1\lambda_2}.$$

2.49 При освещении металлической пластинки светом с частотой $\nu_1 = 8{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц, а затем $\nu_2 = 6{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц обнаружили, что максимальная кинетическая энергия электронов изменилась в 3 раза. Определите работу выхода электронов A из этого металла.
Ответ: $A_{вых} = 2{,}0$ эВ.

2.50 В процессе фотоэффекта электроны, вырываемые с поверхности металла излучением с частотой $\nu_1 = 2{,}00 \cdot 10^{15}$ Гц, полностью задерживаются напряжением $U_{з1} = 7{,}0$ В, а при частоте $\nu_2 = 3{,}93 \cdot 10^{15}$ Гц – напряжением $U_{з2} = 15{,}0$ В. Вычислите по этим данным постоянную Планка h.
Ответ: $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

2.51 Фотоны, имеющие энергию $\varepsilon = 4{,}9$ МэВ, вырывают электроны из металла. Работа выхода $A_{вых} = 4{,}5$ эВ. Найдите максимальный импульс p_{max}, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.
Ответ: $p_{max} = 3{,}4 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с.

2.52 Под каким напряжением U работает рентгеновская трубка, если при силе тока $I = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ А и коэффициенте полезного действия $\eta = 8{,}0$ % она излучает $n = 2{,}0 \cdot 10^{13}$ фотонов в секунду? Частота излучения $\nu = 3{,}0 \cdot 10^{18}$ Гц.
Ответ: U = 50,0 кВ.

2.53 Рентгеновская трубка, работающая под напряжением $U = 50{,}0$ кВ и потребляющая ток силой $I = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ А, излучает за одну секунду $2{,}0 \cdot 10^{13}$ фотонов со средней длиной волны $\lambda = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ м. Определите коэффициент полезного действия установки η рентгеновской трубки.
Ответ: η = 8,0 %.

2.54 Энергия рентгеновских лучей $\varepsilon = 0{,}60$ МэВ. Найдите энергию T_e электронов отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после рассеяния изменилась на 20 %.
Ответ: T_e = 0,10 МэВ.

2.55 На площадку $S = 0{,}010$ м^2 падает свет, мощность которого 1,0 Дж/с. Найдите давление света p_1, если поверхность полностью отражает лучи, и давление p_2, если поверхность полностью поглощает падающие на нее лучи.
Ответ: $p_1 = 3{,}3 \cdot 10^{-7}$ Па; $p_2 = 6{,}7 \cdot 10^{-7}$ Па.

2.56 Фотон с энергией $\varepsilon = 1{,}029$ МэВ рассеян на почти свободном электроне. Определите угол рассеяния фотона θ, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной комптоновской длине волны $\lambda_к = 2{,}44$ пм.
Ответ: $\theta = 60°$.

2.2. АТОМ ВОДОРОДА В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ. УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА. СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Краткие теоретические сведения

Модуль импульса *p* движения частицы с нерелятивистской скоростью *v*

$$p = mv,\ m \equiv m_0,$$

с релятивистской скоростью *v*

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 – масса покоя частицы.

Длина волны де Бройля равномерно движущейся частицы

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

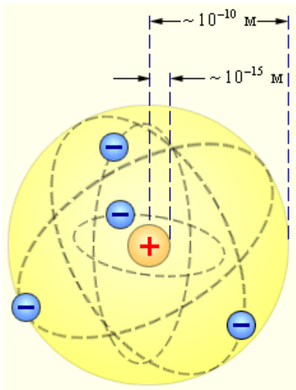


Рис. 2.2

Энергетическим уровнем называется значение энергии, которой обладает электрон в атоме (рис. 2.2).

Энергетическое состояние атома водорода определяется тем, какой энергетический уровень занимает его электрон.

Постулаты Бора

Первый постулат (постулат стационарных состояний): в атоме существуют стационарные состояния; находясь в них, атом не излучает.

Второй постулат (правило частот): при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое излучается или поглощается один фотон с энергией

$$h\nu_{kn} = \left|E_k - E_n\right|,$$

где n, k – номера энергетических уровней электрона в атоме;

ν_{kn} – частота фотона;

E_n и E_k – энергии стационарных состояний атома водорода, соответствующих энергетическим уровням с номерами n и k.

Третий постулат (правило квантования орбит): в стационарном состоянии атома электрон, движущийся по круговой орбите, имеет квантованные значения момента импульса

$$m\upsilon_n r_n = n\hbar,$$

где m – масса электрона;

$\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка;

υ_n – скорость электрона на n-ной орбите радиуса r_n.

Радиус *n*-ной орбиты r_n движения электрона в атоме водорода

$$r_n = a_0 n^2,$$

где $a_0 = \dfrac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{me^2} = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м – первый боровский радиус.

Серией называется совокупность линий излучения с частотами ν_{kn}, полученная при переходах электрона **атома с более высоких энергетических уровней с номерами $k = n + 1$, $n + 2$**… на общий энергетический уровень с **номером n**.

Формула Бальмера − Ридберга, определяющая частоты (длины волн) в дискретном линейчатом спектре атома водорода,

$$\nu_{kn} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$$

или

$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = R'\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right),$$

где $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}$ с$^{-1}$ – постоянная Ридберга;

$R' = \dfrac{R}{c} = 1{,}0973 \cdot 10^7$ м$^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Серии излучения атома водорода (рис. 2.3):
ультрафиолетовая область – серия Лаймана (n = 1, k = 2, 3, 4…);
видимый диапазон – серия Бальмера (n = 2, k = 3, 4, 5…);
инфракрасная область – серия Пашена (n = 3, k = 4, 5, 6…);
серия Брекета (n = 4, k = 5, 6, 7…); серия Пфунда (n = 5, k = 6, 7, 8…);
серия Хемфри (n = 6, k = 7, 8, 9…).

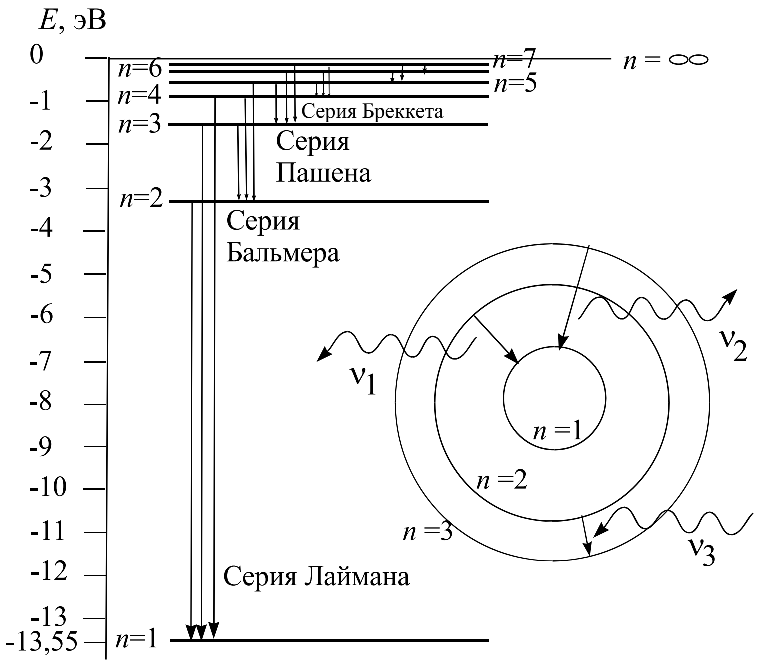


Рис. 2.3

Основным состоянием электрона в атоме водорода называется состояние с наименьшим значением энергии (при $n = 1$)

$$E_1 = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2} = -13{,}55 \text{ эВ}.$$

Значения энергии электрона в атоме водорода на *n*-ном уровне

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

$$E_n = -\frac{13{,}55}{n^2} \text{эВ},$$

где $n = 1, 2, 3\ldots$ – главное квантовое число.

Энергия связи электрона в атоме водорода численно равна абсолютной величине E_n.

Энергией ионизации атома называется энергия, которую нужно сообщить электрону в атоме, чтобы удалить электрон из атома. **Энергия ионизации атома равна энергии связи электрона.**

Соотношение неопределенностей Гейзенберга: микрочастица не может одновременно иметь определенную координату и определенную соответствующую ей проекцию импульса. При этом произведение неопределенностей координаты и соответствующей ей проекции импульса не может быть меньше величины порядка $\frac{\hbar}{2}$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2},$$

где Δx – точность определения координаты x;

Δp_x – точность измерения проекции импульса на ось x.

Соотношение неопределенности между энергией и временем:

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

где ΔE – точность определения энергии системы;

Δt – точность измерения времени.

Уравнение Шредингера для стационарных состояний

$$\Delta\psi(x,y,z)+\frac{2m}{\hbar^2}\left(E-U\right)\psi(x,y,z)=0,$$

где $\Psi(x,y,z)$ – собственная волновая функция, описывающая состояние частицы;

$\Delta=\dfrac{\partial^2}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

m – масса частицы;

E – полная энергия частицы;

$U=U(x,y,z)$ − потенциальная энергия частицы.

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2}+\frac{2m}{\hbar^2}\left(E-U\right)\psi(x)=0,$$

где $\Psi(x)$ – собственная волновая функция, описывающая состояние частицы;

$U=U(x)$ − потенциальная энергия частицы.

Решение уравнения Шредингера для бесконечно глубокой потенциальной ямы шириной *l*:
собственные волновые функции частицы

$$\psi_n(x)=\sqrt{\frac{2}{l}}\sin\frac{\pi n}{l}x,$$

собственные значения энергии частицы

$$E_n=\frac{\pi^2\hbar^2}{2ml^2n^2}.$$

Вероятность обнаружения частицы в интервале Δx

$$w=\int\left|\psi(x)\right|^2dx,$$

где $\left|\psi(x)\right|^2$ – квадрат модуля собственной волновой функции.

Примеры решения задач

Задача 1. Электрон в атоме водорода перешел с четвертого энергетического уровня на третий. Определите величину энергии ε испущенного при этом фотона.

Дано:
$k = 4$;
$n = 3$;
$E_1 = 13{,}55$ эВ

Найти: ε

Решение. Для определения энергии ε испущенного фотона воспользуемся правилом частот Бора

$$\varepsilon = h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

Так как

$$E_n = -\frac{E_1}{n^2} = -\frac{13{,}55}{n^2}, \qquad E_k = -\frac{E_1}{k^2} = -\frac{13{,}55}{k^2},$$

то энергия фотона

$$\varepsilon = -\frac{13{,}55}{k^2} + \frac{13{,}55}{n^2} = 13{,}55\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

Производя вычисления, получим

$$\varepsilon = 13{,}55\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}\right) = 0{,}47 \text{ эВ}.$$

Ответ: ε = 0,47 эВ.

Задача 2. Найдите длину волны де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией: 1) $T_{к1} = 100{,}0$ эВ; 2) $T_{к2} = 3{,}0$ МэВ.

Дано: $T_{к1} = 100{,}0$ эВ =
$= 1{,}6 \cdot 10^{-17}$ Дж;
$T_{к2} = 3{,}0$ МэВ =
$= 4{,}8 \cdot 10^{-13}$ Дж;
$m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг;

Решение. 1) Кинетическая энергия электрона

$$T_{к1} << m_0 c^2,$$

$c = 3{,}0 \cdot 10^8$ м/с^2; $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	где $m_0\ c^2$ = 0,511 МэВ – энергия покоя электрона.
Найти: λ_1, λ_2	В этом случае электрон является нерелятивистским. Поэтому $m = m_0$ и

$$T_{к1} = \frac{m_0 v^2}{2} = \frac{p^2}{2m_0}.$$

Длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 T_{к1}}}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$\lambda = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9{,}1 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-17}}} = 1{,}23 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

2) В данном случае кинетическая энергия электрона $T_{к2} > m_0c^2$. Электрон следует считать релятивистской частицей. Поэтому модуль импульса и кинетическая энергия электрона определяются следующим образом:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},\ T_{к2} = mc^2 - m_0c^2. \qquad (2.11)$$

Исключив из формул (2.11) величину $\frac{v}{c}$, получим

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{2m_0c^2 T_{к2} + T_{к2}^2}.$$

Следовательно, длина волны де Бройля

$$\lambda_2 = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{2m_0c^2T_{к2} + T_{к2}^2}}.$$

Проведем вычисления

$$\lambda_2 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3 \sqrt{2 \cdot 0,511 \cdot 3,0 + 9,0}} = 0,34\ \text{пм}.$$

Ответ: $\boldsymbol{\lambda_1 = 1,23 \cdot 10^{-10}}$ **м;** $\boldsymbol{\lambda_2 = 0,34}$ **пм.**

Задача 3. В невозбужденном атоме средняя кинетическая энергия электрона $T_к$ = 13,6 эВ. Исходя из соотношения неопределенностей, найдите наименьшую неопределенность Δx, с которой можно вычислить координату электрона в атоме.

Дано:
$T_к$ = 13,6 эВ =
= 21,76 · 10^{-19} Дж;
m_0 = 9,1 · 10^{-31} кг;
h = 6,62 · 10^{-34} Дж·с

Найти: Δx

Решение. Из соотношения неопределенностей следует, что неопределенность координаты

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2\Delta p_x}. \qquad (2.12)$$

Величина неопределенности проекции импульса Δp_x на направление OX неизвестна. Однако среднее значение импульса p легко найти, поскольку известна средняя кинетическая энергия электрона $T_к$. Так как $T_к \ll m_0 c^2$ = 0,511 МэВ, то электрон рассматриваем как нерелятивистскую частицу.

Тогда

$$T_к = \frac{p^2}{2m}, \quad p = \sqrt{2mT_к}.$$

Неопределенность проекции импульса на ось OX не может быть больше величины модуля импульса p. Поэтому принимаем $\Delta p_x = p$. Тогда из формулы (2.12) находим

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2\sqrt{2mT_{\text{к}}}}.$$

Произведя вычисления, находим

$$\Delta x \geq \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{4 \cdot 3,14\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 21,76 \cdot 10^{-19}}} = 0,26 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Как следует из последнего соотношения, наименьшая допустимая соотношением неопределенностей погрешность сравнима по порядку величины с первым боровским радиусом ($0,53 \cdot 10^{-10}$ м). Данный результат подчеркивает тот факт, что понятие о траектории движения электрона в атоме в квантовой механике теряет смысл.
Ответ: $\Delta x = 0,26 \cdot 10^{-10}$ м.

Задача 4. Частица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l. Найдите вероятность обнаружения частицы в областях: $0 \leq x \leq l/3$ и $l/3 < x \leq 2l/3$.

Дано:
$0 \leq x \leq l/3$;
$l/3 < x \leq 2l/3$;
$n = 1$

Найти: w_1, w_2

Решение. Элементарная вероятность обнаружения частицы в интервале dx равна

$$dw = |\psi(x)|^2 \, dx.$$

Тогда вероятность w_1 найти частицу в области $0 \leq x \leq l/3$ определяется следующим образом:

$$w_1 = \int_0^{l/3} |\psi(x)|^2 dx. \tag{2.13}$$

Собственная волновая функция частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме, имеет вид

$$\psi_n(x) = \sqrt{2/l}\sin\frac{\pi n}{l}x. \qquad (2.14)$$

Так как частица находится в основном состоянии, то $n = 1$, поэтому выражение (2.13) с учетом формулы (2.14) примет вид

$$w_1 = \frac{2}{l}\int_0^{l/3}\sin^2\frac{\pi x}{l}dx. \qquad (2.15)$$

Используя соотношение

$$\sin^2\alpha = (1 - \cos 2\alpha)/2,$$

вычисляем интеграл (2.15)

$$w_1 = \frac{1}{l}\left[\int_0^{l/3}dx - \int_0^{l/3}\cos\frac{2\pi x}{l}dx\right] = \frac{1}{l}\left[\frac{l}{3} - \frac{l}{2\pi}\sin\frac{2\pi x}{l}\right] = 0{,}195.$$

Вероятность пребывания в правой крайней трети ямы w_3 в силу симметрии будет также равна w_1.

Поскольку суммарная вероятность пребывания частицы в яме равна единице, то

$$w_2 = 1 - 2w_1 = 0{,}610.$$

Ответ: $w_1 = 0{,}195$; $w_2 = 0{,}610$.

ЗАДАЧИ

4 балла

2.57 В чем заключается физическая сущность первого постулата Бора?

2.58 На рис. 2.4 представлены первые четыре энергетических уровня атома водорода. Какой из переходов соответствует излучению фотона максимальной энергии? Какой из переходов соответствует поглощению фотона максимальной длины волны? Ответ обоснуйте.
Ответ: 3; 4.

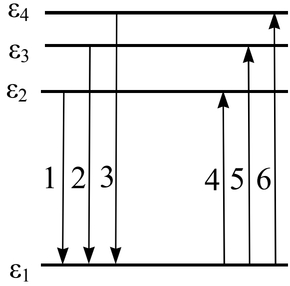


Рис. 2.4

2.59 Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией $T_к$ = 10 эВ. Определите величину энергии ε фотона.
Ответ: ε = 23,6 эВ.

2.60 На сколько изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны λ = 435,0 нм?
Ответ: $\Delta T_к$ = 2,85 эВ.

2.61 Определите изменение энергии ΔE электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с частотой $\nu = 6{,}28 \cdot 10^{14}$ Гц.
Ответ: ΔE = 2,6 эВ.

2.62 Вычислите по теории Бора период T движения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом $n = 2$.
Ответ: $T = 1{,}21 \cdot 10^{-15}$ с.

2.63 Вычислите по теории Бора радиус r_2 второй стационарной орбиты для атома водорода.
Ответ: $r_2 = 1{,}1 \cdot 10^6$ м/с.

2.64 Определите величину энергии фотона ε, испускаемого атомом водорода, при переходе электрона с третьей орбиты на вторую.
Ответ: $\varepsilon = 1{,}9$ эВ.

2.65 При переходе электрона в атоме водорода с четвертой стационарной орбиты на вторую излучается фотон с энергией $\varepsilon = 4{,}09 \cdot 10^{-19}$ Дж. Какова длина волны λ этой линии спектра?
Ответ: $\lambda = 4{,}86 \cdot 10^{-7}$ м.

2.66 Определите длину волны де Бройля λ для электрона, кинетическая энергия которого $T_к = 103$ эВ.
Ответ: $\lambda = 1{,}21 \cdot 10^{-10}$ м.

2.67 Альфа-частица находится в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме. Используя соотношение неопределенностей, оцените ширину l ямы, если известно, что минимальная энергия α-частицы $E_{\min} = 8{,}0$ МэВ.
Ответ: $l = 1{,}6 \cdot 10^{-15}$ м.

2.68 Электрон находится в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме шириной l. Запишите уравнение Шредингера для этого случая.

5−6 баллов

2.69 Вычислить линейную скорость v и период движения T электрона на первой боровской орбите атома водорода. Радиус первой орбиты $a_0 = 0{,}528 \cdot 10^{-10}$ м.
Ответ: $v = 2{,}2 \cdot 10^6$ м/с; $T = 1{,}5 \cdot 10^{-16}$ с.

2.70 Во сколько раз изменится период T вращения электрона в атоме водорода, если при переходе в невозбужденное состояние атом излучил фотон с длиной волны $\lambda = 97{,}5$ нм?
Ответ: в 27 раз.

2.71 Определите максимальную энергию фотона ε серии Бальмера в спектре излучения атома водорода.
Ответ: $\varepsilon = 3{,}4$ эВ.

2.72 Атом водорода перешел из нормального состояния в возбужденное, характеризуемое главным квантовым числом $n = 2$. Найдите величину энергии ΔE, необходимой для перевода атома водорода в указанное возбужденное состояние.
Ответ: $\Delta E = 10{,}2$ эВ.

2.73 Найдите наибольшую λ_{max} и наименьшую λ_{min} длины волн для серии Лаймана.
Ответ: $\lambda_{max} = 120$ нм; $\lambda_{min} = 90$ нм.

2.74 Найдите потенциал ионизации атома водорода.
Ответ: $\varphi_i = 13{,}6$ В.

2.75 Вычислите длину волны де Бройля λ для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U = 22{,}5$ В.
Ответ: $\lambda = 0{,}258$ нм.

2.76 Определите длины волн де Бройля α-частицы и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов $U = 1{,}0$ кВ.
Ответ: $\lambda_1 = 9{,}0 \cdot 10^{-13}$ м; $\lambda_1 = 3{,}2 \cdot 10^{-13}$ м.

2.77 Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя $2m_0c^2$. Вычислите длину волны де Бройля λ для такого электрона.
Ответ: $\lambda = 8{,}6 \cdot 10^{-13}$ м.

2.78 Используя соотношение неопределенностей, оцените наименьшие ошибки Δv в определении скорости электрона и протона, если координаты центра масс этих частиц могут быть установлены с неопределенностью 1,0 мкм.
Ответ: $\Delta v_э$ = 58 м/с; $\Delta v_{пр}$ = 316 м/с.

2.79 Оцените с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию $T_{к\min}$ электрона, движущегося внутри сферической области диаметром d = 0,10 нм.
Ответ: $T_{к\min}$ = 15 эВ.

2.80 Какова должна быть кинетическая энергия $T_к$ протона в моноэнергетическом пучке, используемого для исследования структуры с линейными размерами $l \sim 10^{-13}$ см?
Ответ: $T_к$ = 20,6 МэВ.

2.81 Определите относительную неопределенность $\Delta p/p$ импульса движущейся частицы, если допустить, что неопределенность ее координаты равна длине волны де Бройля.
Ответ: $\Delta p/p$ = 0,16.

2.82 Частица находится в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной яме. Найдите отношение разности $\Delta E_{n,n+1}$ соседних энергетических уровней к энергии E_n частицы в трех случаях: 1) $n = 2$; 2) $n = 5$; 3) $n \to \infty$.
Ответ: $\dfrac{\Delta E_{2,3}}{E_2} = \dfrac{5}{4}$; $\dfrac{\Delta E_{5,6}}{E_5} = \dfrac{11}{25}$; $\dfrac{\Delta E_{n\to\infty}}{E_{n\to\infty}} = 0.$

2.83 Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l = 0,10 нм. Определите в электрон-вольтах наименьшую разность энергетических уровней электрона.
Ответ: $\Delta E_{\min}$ = 112 эВ.

2.84 Частица находится в бесконечно глубокой потенциальной яме в энергетическом состоянии с квантовым числом $n = 2$. Напишите выражение для волновой функции в этом случае. Найдите $|\psi(x)|^2$. Чему равен $|\psi(x)|^2$, если $x = l/2$? Ответ проинтерпретируйте.

7−8 баллов

2.85 Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны $\lambda = 102{,}6$ нм. Вычислите, пользуясь теорией Бора, радиус r электронной орбиты возбужденного атома водорода.
Ответ: $r = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ м.

2.86 Вычислите по теории Бора период T движения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, если квантовое число $n = 2$.
Ответ: $T = 1{,}2 \cdot 10^{-15}$ с.

2.87 В каких пределах $\Delta\lambda$ должна лежать длина волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атома водорода квантами этого света радиус орбиты электрона увеличился в 16 раз?
Ответ: 95,0 нм < λ < 102,0 нм.

2.88 Переход электрона в атоме водорода с k-й на n-ю орбиту ($n = 1$) сопровождается излучением фотона с длиной волны $\lambda = 102{,}6$ нм. Найдите радиус n-й орбиты.
Ответ: $r_n = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ м.

2.89 Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определите кинетическую $T_к$, потенциальную U и полную энергию E электрона. Ответ выразите в электрон-вольтах.
Ответ: $T_к = 1{,}5$ эВ; $U = -3$ эВ; $E = -1{,}5$ эВ.

2.90 Красная линия в спектре атома водорода имеет длину волны 658,6 нм и излучается при переходе возбужденного атома с третьего энергетического уровня на второй. Найдите длины волн λ_{kn} еще четырех спектральных линий из серии Бальмера.
Ответ: $\lambda_{32} = 656{,}3$ нм; $\lambda_{42} = 486{,}1$ нм; $\lambda_{52} = 434{,}1$ нм; $\lambda_{62} = 410{,}2$ нм.

2.91 Во сколько раз k изменится период движения электрона в атоме водорода, если при переходе в невозбужденное состояние атом излучил фотон с длиной волны $\lambda = 97{,}5$ нм?
Ответ: $k = 27$.

2.92 Энергия атома водорода в основном состоянии $E_1 = -13{,}53$ эВ. Определите энергию кванта и длину волны излучения, поглощенного атомом водорода, если электрон перешел с первого на третий энергетический уровень.
Ответ: $\varepsilon = 12{,}02$ эВ; $\lambda = 103$ нм.

2.93 Определите минимальную энергию возбуждения атома водорода, если его энергия в нормальном состоянии $E_1 = -15{,}53$ эВ.
Ответ: $\Delta E = 10{,}15$ эВ.

2.94 Определите величину длины волны де Бройля для электрона, движущегося по первой боровской орбите в атоме водорода.
Ответ: $\lambda = 6{,}4 \cdot 10^{-11}$ м.

2.95 Электрон обладает кинетической энергией $W_к = 1{,}02$ МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия электрона уменьшится вдвое?
Ответ: $\lambda_1/\lambda_2 = 0{,}612$.

2.96 Протон обладает кинетической энергией $T_к = 1{,}0$ кэВ. Определить дополнительную энергию ΔE, которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волны де Бройля λ уменьшилась в три раза.
Ответ: $\Delta E = 8{,}0$ кэВ.

2.97 Для приближенной оценки минимальной энергии электрона в атоме водорода можно предположить, что неопределенность Δr радиуса r электронной орбиты и неопределенность Δp импульса p электрона на такой орбите соответственно определяются следующим образом: $\Delta r \approx r$ и $\Delta p \approx p$. Используя эти связи, а также соотношение неопределенностей, определите минимальное значение энергии E_{min} электрона в атоме водорода.
Ответ: $E_{min} = 13{,}5$ эВ.

2.98 Используя соотношение неопределенностей, оцените ширину l одномерной потенциальной ямы, в которой минимальная энергия электрона $E_{\min}$ = 10,0 эВ.
Ответ: l = 0,123 нм.

2.99 Частица в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме находится в основном состоянии. Какова вероятность w обнаружения частицы в крайней четверти ямы?
Ответ: w = 0,091.

2.100 Частица находится в основном состоянии в прямоугольной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками. Во сколько раз отличаются вероятности местонахождения частицы: w_1 – в крайней трети и w_2 – в крайней четверти ямы?
Ответ: w_1 / w_2 = 2,152.

2.101 Частица в бесконечно глубокой потенциальной яме находится в основном состоянии. Какова вероятность w обнаружения частицы: в средней трети ямы; в крайней трети ямы?
Ответ: w_1 = 0,609; w_2 = 0,195.

2.102 В прямоугольной потенциальной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками ($0 < x < l$) находится частица в основном состоянии. Найдите вероятность w местонахождения частицы в области $1/4l < x < 3/4l$.
Ответ: w = 0,82.

2.103 Собственная функция, описывающая состояние частицы в потенциальной яме, имеет вид $\psi_n(x) = C\sin\frac{\pi n}{l}x$. Используя условия нормировки волновой функции, определите постоянную C.
Ответ: $C = \sqrt{2/l}$.

9−10 баллов

2.104 Найдите модуль напряженности E электрического поля на четвертой электронной орбите в атоме водорода.
Ответ: $\boldsymbol{E}$ = 2,0 · 10^9 В/м.

2.105 Найдите с точностью до двух значащих цифр значение постоянной Ридберга R' в формуле Бальмера, зная, что наименьшая частота излучения в видимой области спектра атома водорода $\nu = 457{,}2 \cdot 10^{12}$ Гц.
Ответ: $\boldsymbol{R'}$ = 1,097 · 10^7 м$^{-1}$.

2.106 Фотон с энергией ε = 16,5 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость v будет иметь электрон вдали от ядра атома?
Ответ: $\boldsymbol{v}$ = 1,0 Мм/с.

2.107 Электрон в невозбужденном атоме водорода получил энергию E = 12,0 эВ. На какой энергетический уровень n он перешел? Сколько линий N можно обнаружить в спектре излучения при переходе на более низкие энергетические уровни? Энергия основного состояния $E_1 = -13{,}53$ эВ.
Ответ: $\boldsymbol{n}$ = 3; $\boldsymbol{N}$ = 3.

2.108 Из катодной трубки на диафрагму с узкой прямоугольной щелью нормально к плоскости диафрагмы направлен поток моноэнергетических электронов. Определите анодное напряжение трубки U, если известно, что на экране, отстоящем от щели на расстоянии l = 0,50 м, ширина центрального дифракционного максимума Δx = 10,0 мкм. Ширину b щели принять равной 0,10 мм.
Ответ: $\boldsymbol{U}$ = 1,5 В.

2.109 Электрон движется по окружности радиуса R = 0,50 см в магнитном поле, модуль индукции которого $B = 8{,}0 \cdot 10^{-3}$ Тл. Определите длину волны де Бройля λ.
Ответ: $\boldsymbol{\lambda}$ = 1,04 · 10^{-10} м.

2.110 Вычислите длину волны де Бройля λ для протона, движущегося со скоростью $v = 0{,}6c$ (c – скорость света в вакууме).
Ответ: $\lambda = 1{,}76$ фм.

2.111 При каких значениях кинетической энергии $T_к$ электрона ошибка в определении длины волны де Бройля λ по нерелятивистской формуле не превышает 10 %?
Ответ: $T_к = 3{,}84 \cdot 10^{-14}$ Дж.

2.112 Электрон находится в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме с непроницаемыми стенками. Ширина ямы $l = 0{,}20$ нм, энергия электрона в яме $E = 37{,}8$ эВ. Определите номер n энергетического уровня и модуль волнового вектора k.
Ответ: $n = 2$; $k = 3{,}14 \cdot 10^{10}$ м$^{-1}$.

2.113 Частица в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l находится в возбужденном состоянии, определяемым квантовым числом $n = 3$. Определите, в каких точках интервала $0 < x < l$ плотность вероятности нахождения частицы имеет максимальное и минимальное значения.

Ответ: минимальное значение: $0,\ \frac{l}{3},\ \frac{2}{3}l,\ l$;

максимальное значение: $\frac{l}{6},\ \frac{l}{2},\ \frac{5l}{6}$.

2.114 Собственная волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид $\psi(r) = Ae^{-r/a_0}$, где A – некоторая постоянная; a_0 – первый боровский радиус. Найдите для основного состояния атома водорода наиболее вероятное расстояние электрона от ядра.
Ответ: $r = a_0$.

3. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Краткие теоретические сведения

Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов (рис. 3.1). Протон – положительно заряженная частица, имеющая заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Нейтрон не имеет электрического заряда.

Нуклоны – группа элементарных частиц, в которую входят протоны и нейтроны.

Зарядом ядра называется величина Ze, где Z – порядковый номер хи-мического элемента в периодической системе Менделеева, равный числу протонов в ядре; e – заряд протона.

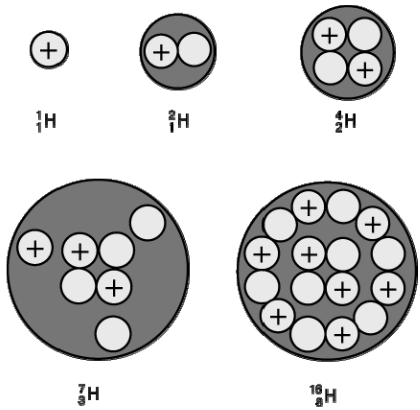


Рис. 3.1

Массовое число

$$A = Z + N,$$

где Z – число протонов в ядре;

N – число нейтронов в ядре.

Радиоактивность – самопроизвольное превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого химического элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц и γ-излучения.

Период полураспада $T_{1/2}$ – промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшится вдвое.

Закон радиоактивного распада: при самопроизвольном распаде число радиоактивных атомных ядер уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 3.2):

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

где N_0 – количество радиоактивных ядер в образце в начальный момент времени $t = 0$;

N – количество радиоактивных ядер в образце, не распавшихся к моменту времени t;

λ – постоянная радиоактивного распада:

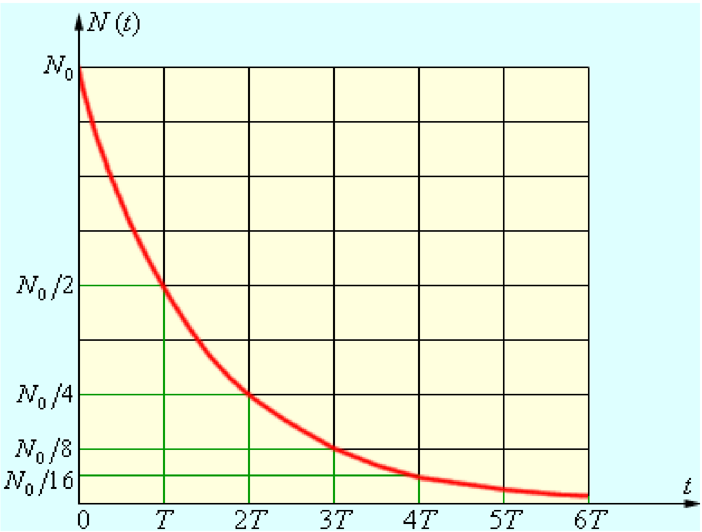


Рис. 3.2

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

Число распавшихся к моменту времени t ядер

$$N_{\text{рас}} = N_0 - N.$$

Активность A радиоактивного образца − число распадов ядер, произошедших за единицу времени:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t},$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

$$A_0 = \lambda N_0,$$

где A_0 – активность образца в начальный момент времени $t = 0$;

A – активность образца в момент времени t.

Изотопы – один и тот же химический элемент, ядра которого содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Например, изотопы водорода: ${}_1^1\mathrm{H}$, ${}_1^2\mathrm{H}$, ${}_1^3\mathrm{H}$.

Число атомов радиоактивного изотопа, содержащихся в образце массой m:

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

где M – молярная масса изотопа;

N_A – число Авогадро.

При протекании ядерных реакций должны соблюдаться основные законы сохранения: энергии, импульса, заряда, массовых чисел. Законы сохранения массовых чисел и зарядового числа называются **правилами смещения: сумма зарядов (массовых чисел) образующихся ядер и частиц равна сумме зарядов (массовых чисел) исходных ядер и исходных частиц.**

Схема α-распада:

$${}_z^A X \to {}_{z-2}^{A-4} Y + {}_2^4\mathrm{He},$$

где ${}_2^4\mathrm{He}$ – ядро атома гелия, называемое α-частицей.

Виды β-распада: электронный β^--распад, позитронный β^+-распад и электронный *K*-захват.

Схема β^--распада с испусканием электрона $_{-1}^{0}e$:

$$ {}_z^A X \rightarrow {}_{z+1}^{\;\;A}Y + {}_{-1}^{\;0}e + {}_0^0\tilde{\nu}, $$

где $_0^0\tilde{\nu}$ − антинейтрино электронное, вылетающее из ядра.

Схема β^+-распада с испусканием позитрона $_{+1}^{0}e$:

$$ {}_z^A X \rightarrow {}_{z-1}^{\;\;A}Y + {}_{+1}^{\;0}e + {}_0^0\nu, $$

где $_0^0\nu$ − нейтрино электронное, вылетающее из ядра.

Схема электронного *K*-захвата:

$$ {}_z^A X + {}_{-1}^{\;0}e \rightarrow {}_{z-1}^{\;\;A}Y + {}_0^0\nu. $$

Дефект массы ядра Δm – уменьшение суммарной массы при образовании ядра из составляющих его нуклонов:

$$ \Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_я, $$

где m_p и m_n – массы протона и нейтрона соответственно;
$m_я$ – масса образовавшегося ядра.

Энергия связи ядра − работа, которую необходимо затратить для расщепления или образования ядра:

$$ E_{св} = c^2 \Delta m. $$

Энергия связи ядра, определяемая в МэВ,

$$ E_{св} = 931{,}5\ \Delta m, $$

где Δm − дефект массы ядра, вычисленный в атомных единицах массы (а.е.м.).

Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на один нуклон (рис. 3.3)

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

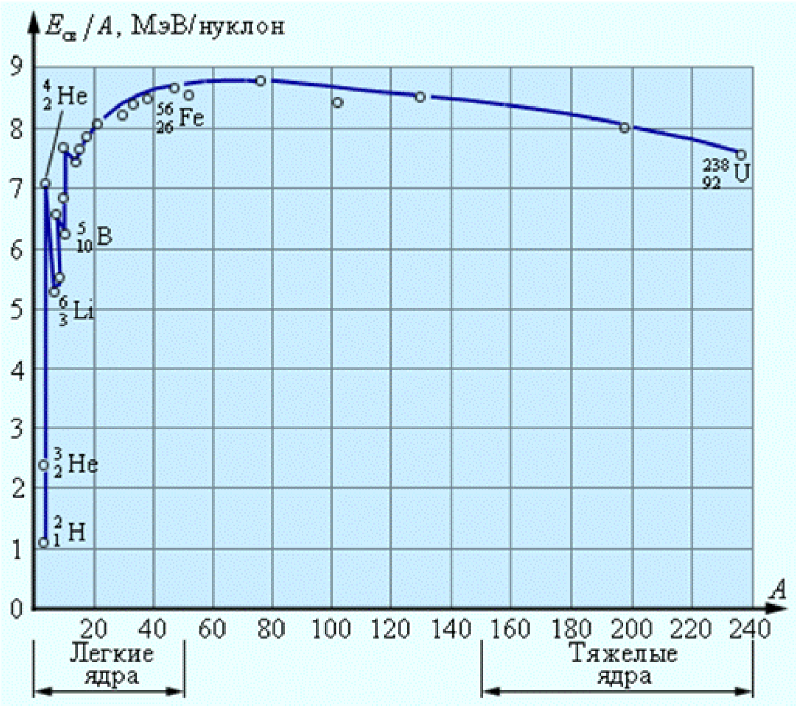


Рис. 3.3

Ядерные реакции – превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием с элементарными частицами или друг с другом.

Схематическая запись ядерных реакций

$$X + a \rightarrow Y + b,$$

где X и Y – исходное и образовавшееся ядра соответственно;

a и b – исходная и конечная частицы в реакции.

Энергия ядерной реакции (энергетический выход реакции)

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где m_1 и m_2 – массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы, выраженные в кг;

m_3 и m_4 – массы покоя ядер и частиц, возникающих в результате реакции, выраженные в кг.

Реакция протекает:

с поглощением энергии, если $Q < 0$,

с выделением энергии, если $Q > 0$.

Примеры решения задач

Задача 1. Вычислите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$.

Дано:
$m_{{}^{16}_{8}\mathrm{O}} = 15{,}9949$ а.е.м.;
$m_{{}^{1}_{1}\mathrm{H}} = 1{,}00783$ а.е.м.;
$m_n = 1{,}00867$ а.е.м.

Найти: Δm, $E_{\text{св}}$, $E_{\text{уд}}$.

Решение. Дефект массы ядра определяется по формуле

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \qquad (3.1)$$

где Z – зарядовое число;
A – массовое число;
m_p – масса протона;
m_n – масса нейтрона;
$m_{\text{я}}$ – масса ядра.

Формулу (3.1) можно также записать в виде

$$\Delta m = Zm_{{}^{1}_{1}\mathrm{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \qquad (3.2)$$

где $m_{{}^{1}_{1}\mathrm{H}}$ – масса ядра ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$;

$m_{\text{я}}$ – масса ядра, для которого определяется дефект масс.

Для ядра ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ число протонов $Z = 8$, массовое число $A = 16$. Подставляя числовые данные в формулу (3.2), получим

$$\Delta m = 8 \cdot 1{,}00783 + (16 - 8) \cdot 1{,}00867 - 15{,}9949 = 0{,}13708 \text{ а.е.м.}$$

Поскольку дефект массы вычислен в а.е.м., то энергию связи ядра будем определять в МэВ по формуле

$$E_{\text{св}} = 931{,}5\Delta m.$$

Величина энергии связи равна

$$E_{\text{св}} = 931{,}5 \cdot 0{,}13708 = 127{,}7 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$E_{\text{уд}} = \frac{127{,}6}{16} = 7{,}98 \text{ МэВ / нуклон}.$$

Ответ: $\Delta m = 0{,}13708$ а.е.м.; $E_{\text{св}} = 127{,}7$ МэВ;
$E_{\text{уд}} = 7{,}98$ МэВ/нуклон.

Задача 2. Определите начальную активность A_0 радиоактивного препарата магния ${}^{27}\mathrm{Mg}$ массой $m = 0{,}20$ мкг, а также его активность A через время $t = 6$ ч. Период полураспада магния $T_{1/2} = 10{,}0$ мин.

Дано:
$m = 2{,}0 \cdot 10^{-10}$ кг;
$M = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль;
$t = 6$ ч $= 21{,}6 \cdot 10^{3}$ с;

Решение. Активность A радиоактивного образца характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа dN ядер, распавшихся за

$T_{1/2}$= 600 с; $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$	интервал времени dt, к этому интервалу:
Найти: A_0, A	

$$\mathrm{A} = -\frac{dN}{dt}. \qquad (3.3)$$

Знак «–» показывает, что число N радиоактивных ядер с течением времени убывает.

Для того чтобы найти $\frac{dN}{dt}$, воспользуемся законом радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \qquad (3.4)$$

где N – число радиоактивных ядер, не распавшихся в препарате к моменту времени t;

N_0 – число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$;

λ – постоянная радиоактивного распада.

Продифференцируем выражение (3.4) по времени

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \qquad (3.5)$$

Исключив из формул (3.3) и (3.5) $\frac{dN}{dt}$, находим активность препарата в момент времени t:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \qquad (3.6)$$

Начальную активность A_0 препарата получим при $t = 0$:

$$A_0 = \lambda N_0. \qquad (3.7)$$

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$\lambda = (\ln 2) / T_{1/2}. \qquad (3.8)$$

Число N_0 радиоактивных ядер, содержащихся в образце, равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν данного изотопа:

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \qquad (3.9)$$

где m – масса изотопа;

M – молярная масса.

С учетом выражений (3.8) и (3.9) формулы (3.7) и (3.6) принимают вид

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

$$A = \frac{m}{M} \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A \cdot e^{\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}.$$

Производим вычисления:

$$A_0 = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,693}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк},$$

$$A = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,693}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot e^{-\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4} = 81,3 \text{ Бк}.$$

Ответ: $\mathbf{A_0 = 5,13 \cdot 10^{12}}$ **Бк;** $\mathbf{A = 81,3}$ **Бк.**

Задача 3. КПД двигателя атомного ледокола равен 17 %, его мощность $P_1 = 3,2 \cdot 10^4$ кВт. Сколько урана-235 расходует атомный реактор в сутки? При делении одного ядра атома урана выделяется энергия $E_0 = 200,0$ МэВ.

Дано:	**Решение.** Энергия, выделяющаяся при делении массы m урана за время t:
КПД = 17 %;	
$t = 86400$ с;	
$P_1 = 3,2 \cdot 10^7$ Вт;	$$E = E_0 N,$$
$E_0 = 200,0$ МэВ =	
$= 3,2 \cdot 10^{-11}$ Дж;	где E_0 – энергия, которая выделяется при распаде одного ядра.
$M = 235 \cdot 10^{-3}$ кг/моль;	
$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$	Число атомных ядер N, содержащихся в этом количестве урана:
Найти: m	

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

где M – молярная масса урана;

N_A – постоянная Авогадро.

Тогда

$$E = E_0 \frac{m}{M} N_A.$$

КПД двигателя определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_1 t}{E} = \frac{P_1 t\, M}{E_0 m\, N_A}.$$

Расход урана атомным реактором в сутки составит

$$m = \frac{P_1 t\, M}{\eta E_0\, N_A}.$$

Подставив в последнюю формулу числовые значения и произведя вычисления, получим:

$$m = \frac{3,2 \cdot 10^7 \cdot 86400 \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{0,17 \cdot 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \approx 0,20\ \text{кг}.$$

Ответ: *m* = 0,20 кг.

Задача 4. Определите зарядовое и массовое числа ядра элемента ${}_{Z}^{A}\mathrm{X}$ и энергетический выход реакции ${}_{4}^{9}\mathrm{Be} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \to {}_{Z}^{A}X + {}_{0}^{1}n$.

Дано:	Решение.
$m_{{}_{4}^{9}\mathrm{Be}} = 9{,}01218$ а.е.м.;	**Решение.** Из законов сохранения заряда и массовых чисел следует, что $Z = 5$, $A = 10$. Поэтому реакцию следует записать в виде
$m_{{}_{5}^{10}\mathrm{B}} = 11{,}00930$ а.е.м.;	$${}_{4}^{9}\mathrm{Be} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \to {}_{5}^{10}\mathrm{B} + {}_{0}^{1}n.$$
$m_{{}_{1}^{1}\mathrm{H}} = 1{,}00783$ а.е.м.;	
$m_n = 1{,}00867$ а.е.м	
Найти: Z, A, Q	

Энгергетический выход ядерной реакции будем определять в МэВ

$$Q = 931,5\left[\left(m_{\mathrm{Be}} + m_{\mathrm{H}}\right) - \left(m_{\mathrm{B}} + m_n\right)\right].$$

Подставляя числовые данные, получим

$$Q = 931,5 \cdot \left[\left(9,01218 + 1,00783\right) - \left(11,00930 + 1,00867\right)\right] =$$
$$= 4,84\ \text{МэВ} > 0, \text{значит, энергия выделяется.}$$

Ответ: *Q* = 4,84 МэВ.

ЗАДАЧИ

4 балла

3.1 Найдите число протонов и нейтронов, входящих в состав изотопов магния $^{24}_{12}Mg$, $^{25}_{12}Mg$, $^{26}_{12}Mg$.

3.2 В атомном ядре число нейтронов превышает число протонов на величину $n = 42$. Определите атомный номер элемента Z, если массовое число ядра $A = 210$.

3.3 Найдите дефект массы Δm, энергию связи $E_{св}$ и удельную энергию связи $E_{уд}$ ядра атома $^{13}_{6}C$.
Ответ: Δm = 0,10102 а.е.м. = 0,1677 · 10^{-27} кг;
$E_{св}$ = 94,1 МэВ; $E_{уд}$= 7,24 МэВ/нуклон.

3.4 Определите удельную энергию связи $E_{уд}$ для ядер: а) $^{11}_{5}B$; б) $^{137}_{56}Ba$; в) $^{235}_{92}U$. Какое ядро является наиболее стабильным?
Ответ: а) $E_{уд}$ = 6,93 МэВ/нуклон;
б) $E_{уд}$ = 8,39 МэВ/нуклон; в) $E_{уд}$ = 7,59 МэВ/нуклон.

3.5 Сколько атомов ΔN полония ($T_{1/2}$ = 138 суток) распадается за одни сутки из $N = 1,0 \cdot 10^6$ атомов?
Ответ: ΔN = 4990 сут$^{-1}$.

3.6 Активность A некоторого изотопа за 10 суток уменьшится на 20 %. Определите период полураспада $T_{1/2}$ этого изотопа.
Ответ: $T_{1/2}$ = 31,1 сут.

3.7 Ядро элемента $^{A}_{Z}X$ испытало два α-распада. Найдите атомный номер Z и массовое число A у нового ядра.

3.8 Ядро элемента $^{A}_{Z}X$ испытало два β-распада. Найдите атомный номер Z и массовое число A у нового ядра.

3.9 Пользуясь таблицей элементов Менделеева и правилами смещения, определить, в какой элемент превращается $^{233}_{92}U$ после шести α- и трех β-распадов.

Ответ: $^{209}_{83}Bi$.

3.10 Пользуясь таблицей элементов Менделеева и правилами смещения, определить, в какой элемент превращается $^{238}_{92}U$ после трех α- и двух β-распадов.

Ответ: $^{226}_{88}Ra$.

3.11 Два ядра $^{4}_{2}He$ слились в одно, и при этом был выброшен протон. Ядро какого элемента образовалось в результате ядерной реакции?

Ответ: $^{7}_{3}Li$.

3.12 Ядро $^{9}_{4}Be$, соединившись с неизвестным ядром, превращается в ядро $^{10}_{5}Be$, при этом в реакции испускается нейтрон. Каким было неизвестное ядро?

Ответ: $^{1}_{1}H$.

3.13 Ядро $^{234}_{93}Np$ захватило электрон из внутренней оболочки атома и затем испустило α-частицу. Какое ядро образовалось в результате этих превращений?

Ответ: $^{230}_{90}Th$.

3.14 Ядро $^{235}_{92}U$, захватив нейтрон, делится на два осколка – $^{140}_{55}Cs$ и $^{99}_{37}Rb$. Сколько нейтронов выделится в такой ядерной реакции деления?

3.15 Допишите недостающее звено X в схеме ядерной реакции:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{10}_{5}\mathrm{B} + X.$$

3.16 Выделяется или поглощается энергия в реакции $^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{0}n$? Определите ее количество Q.
Ответ: поглощается; Q = 2,79 МэВ.

5−6 баллов

3.17 Из каждого миллиона ядер атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определите период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.
Ответ: $T_{1/2}$ = 3465 с = 0,96 ч.

3.18 Найдите период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа, если его активность за 10 суток уменьшилась на 24 % по сравнению с первоначальной.
Ответ: $T_{1/2}$ = 25,25 сут.

3.19 Определите массу m изотопа $^{131}_{53}\mathrm{I}$, имеющего активность A = 37,0 ГБк.
Ответ: $m = 8{,}03 \cdot 10^{-9}$ кг.

3.20 Счетчик α-частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал N_1 = 1400 частиц в минуту, а через время t = 4 ч только N_2 = 400. Определите период полураспада T изотопа.
Ответ: $T_{1/2}$ = 7967 с = 2,2 ч.

3.21 Определите число N атомов радиоактивного препарата йода $^{131}_{53}\mathrm{I}$ массой m = 0,50 мкг, распавшихся в течение времени: 1) t_1 = 1,0 мин; 2) t_2 = 7 сут.
Ответ: 1) $N = 1{,}38 \cdot 10^{11}$; 2) $N = 1{,}05 \cdot 10^{15}$.

3.22 Удельная энергия связи гелия $E_{уд}$ = 7,0 МэВ/нуклон. Найти минимальную энергию E_{min} гамма-кванта в МэВ, способного разделить ядро на четыре свободных нуклона.
Ответ: $\boldsymbol{E_{min}}$ = 28,0 МэВ.

3.23 Считая, что в одном акте деления ядра урана ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ освобождается энергия 200,0 МэВ, определите массу m этого изотопа, подвергшегося делению при взрыве атомной бомбы с тротиловым эквивалентом $30{,}0 \cdot 10^6$ кг, если тепловой эквивалент тротила q равен 4,19 МДж/кг.
Ответ: *m* = 1,53 кг.

3.24 Мощность P двигателя атомного судна составляет 15,0 МВт; его КПД равен 30 %. Определите месячный расход ядерного горючего при работе этого двигателя. За каждый акт деления ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ выделяется энергия 200,0 МэВ.
Ответ: *m* = 1,58 кг.

3.25 Сколько ядер ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ должно делиться в 1,0 сек, чтобы тепловая мощность ядерного реактора была равна 1,0 МВт. Считать, что при каждом распаде выделяется энергия 200,0 МэВ.
Ответ: *N* = $\mathbf{3{,}1 \cdot 10^{10}}$.

3.26 Найдите электрическую мощность P атомной электростанции, расходующей 0,10 кг ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ в сутки, если КПД станции равен 16 %. В каждом акте деления ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ выделяется 200,0 МэВ энергии.
Ответ: *P* = $\mathbf{1{,}5 \cdot 10^7}$ Вт.

3.27 Вычислите КПД двигателей атомного ледокола, если мощность их $P_1 = 3{,}2 \cdot 10^4$ кВт, а атомный реактор расходует m = 200 г урана-235 в сутки. Вследствие деления одного атома выделяется энергия E_0 = 200 МэВ.
Ответ: η = 17 %.

3.28 В одном акте деления ядра урана ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ освобождается энергия 200,0 МэВ. Определите: 1) энергию E, выделяющуюся при распаде всех ядер этого изотопа урана массой m = 1,0 кг; 2) массу $m_{\text{экв}}$ каменного угля с удельной теплотой сгорания q = 29,3 МДж/кг, эквивалентную в тепловом отношении 1,0 кг урана ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$.
Ответ: E = 8,2 · 10^{13} Дж; $m_{\text{экв}}$ = 2.8 · 10^{6} кг.

3.29 Какое количество энергии E освободится в результате деления все ядер ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$, содержащихся в 1,0 кг? При делении одного ядра освобождается энергия 200,0 МэВ.
Ответ: E = 8,2 · 10^{13} Дж.

3.30 Найдите количество α- и β-распадов, которые происходят при радиоактивном распаде ядра ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ и конечном превращении его в стабильное ядро свинца ${}^{198}_{82}\mathrm{Pb}$.
Ответ: 10 α-распадов; 10 β-распадов.

3.31 В результате нескольких α- и β-распадов ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$ превращается в ядро ${}^{212}_{83}\mathrm{Bi}$. Сколько произошло α- и β-распадов?
Ответ: 5 α-распадов; 3 β-распада.

3.32 Радиоактивный изотоп ${}^{234}_{93}\mathrm{Np}$ испытывает α- и β-распады, превращаясь в стабильный изотоп ${}^{210}_{83}\mathrm{Bi}$. Сколько α- и β-распадов происходит в этих превращениях?
Ответ: 6 α-распадов; 2 β-распада.

3.33 Радиоактивный изотоп ${}^{137}_{55}\mathrm{Cs}$ испытывает β-распад и превращается в возбужденное ядро бария Ba, который затем испускает γ-квант и превращается с стабильный изотоп Ba. Запишите данные ядерные реакции.

3.34 Изотоп $^{40}_{19}\text{K}$ испытывает β-распад и превращается в возбужденное ядро кальция Ca, которое, испуская γ-квант, превращается в стабильный изотоп Ca. Запишите данные ядерные реакции.

3.35 Определите энергетический выход Q ядерной реакции $^{3}_{2}\text{He} + ^{3}_{1}\text{H} \rightarrow ^{4}_{2}\text{He} + ^{2}_{1}\text{H}$, если энергия связи у изотопа $^{4}_{2}\text{He}$ равна 28,3 МэВ, у изотопов $^{3}_{2}\text{He}$ энергия связи равна 7,7 МэВ, у трития $^{3}_{1}\text{H}$ − 8,5 МэВ и ядер дейтерия $^{2}_{1}\text{H}$ − 2,2 МэВ.
Ответ: Q = 14,3МэВ.

3.36 Считая радиус атомного ядра $R = 1{,}2\, A^{1/3} \cdot 10^{-15}$ м, где A − массовое число, определите плотность ρ ядерного вещества. Массу нуклона принять равной $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг. Найти массу m_1 в 1,0 см^3 вещества, состоящего только из одних ядер. Задачу рассмотреть на примере изотопа $^{125}_{52}\text{Te}$.
Ответ: $\rho = 2{,}3 \cdot 10^{17}$ кг/м^3; $m_1 = 2{,}3 \cdot 10^{11}$ кг.

7−8 баллов

3.37 За какое время t распадется 7/8 начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период полураспада $T_{1/2}$ = 10 суток.
Ответ: t = 30 сут.

3.38 При захвате ядром $^{235}_{92}\text{U}$ нейтрона происходит деление этого ядра на два осколка. Одним из осколков является ядро $^{99}_{38}\text{Sr}$. Определите, какой будет второй осколок, если в результате реакции деления вылетает еще два нейтрона. Найдите энергию E, которая выделяется при делении одного ядра $^{235}_{92}\text{U}$.
Ответ: E = 200 МэВ.

3.39 Сколько ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ производит реактор мощностью 100 МВт в течение месяца, если принять, что в среднем при одном акте деления ядра ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ возникает 1,5 ядра плутония и выделяется 200 МэВ энергии.
Ответ: $\boldsymbol{m}$ **= 4,82 кг.**

3.40 Тепловая мощность ядерного реактора $1{,}0\cdot10^4$ кВт. Какую массу ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ потребляет реактор в сутки? При каждом распаде выделяется энергия 200,0 МэВ.
Ответ: $\boldsymbol{m}$ **= 10,5 г.**

3.41 Атомная электростанция мощностью 500,0 МВт имеет КПД 20 %. Определите годовой расход m_1 ядерного горючего, если за каждый акт деления ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ выделяется 200,0 МэВ энергии. Сравните полученный результат с годовым расходом m_2 каменного угля тепловой электростанции той же мощности при КПД 75 %. Теплота сгорания каменного угля 29,3 МДж/кг.
Ответ: $\boldsymbol{m_1}$ **= 961,8 кг;** $\boldsymbol{m_2}$ **=** $\mathbf{7{,}17\cdot10^8}$ **кг.**

3.42 Какую наименьшую энергию E нужно затратить, чтобы разделить ядро ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ на две одинаковые части?
Ответ: $\boldsymbol{E}$ **= 23,8 МэВ.**

3.43 Какая энергия E выделяется при синтезе одного ядра ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ из дейтерия и трития?
Ответ: $\boldsymbol{E}$ **= 17,6 МэВ.**

3.44 Какую массу воды $m_{\text{в}}$, взятой при 0 °С, можно довести до кипения, используя энергию термоядерного синтеза гелия из дейтерия и трития (см. задачу 38.43), если КПД преобразования энергии равен 10 %? Масса синтезированного гелия $m = 1{,}0$ г. Удельная теплоемкость воды $c = 4190$ Дж/кг·К.
Ответ: $\boldsymbol{m_{\text{в}}}$ **=** $\mathbf{1{,}0\cdot10^5}$ **кг.**

3.45 Покоящееся ядро распадается на два осколка массами $m_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-25}$ кг и $m_2 = 1{,}0 \cdot 10^{-25}$ кг. Определите скорости v_1 и v_2 осколков ядра, если их суммарная кинетическая энергия $W_к = 6{,}0 \cdot 10^{-11}$ Дж.
Ответ: $v_1 = 1{,}0 \cdot 10^7$ м/с; $v_2 = 3{,}0 \cdot 10^7$ м/с.

3.46 Свободно покоящееся ядро $^{137}_{56}\mathrm{Ba}$, находящееся в возбужденном состоянии с энергией $E = 23{,}8$ кэВ, перешло в основное состояние с излучением γ-кванта. Найдите энергию $E_{отд}$ отдачи ядра.
Ответ: $E_{отд} = 2{,}2 \cdot 10^{-3}$ эВ.

3.47 При бомбардировке изотопа $^{23}_{11}\mathrm{Na}$ дейтронами ($^{2}_{1}\mathrm{H}$) образуется β-активный изотоп $^{24}_{11}\mathrm{Na}$. При первом измерении счетчик β-частиц за 1,0 мин зарегистрировал 170 частиц, а через сутки – 56 частиц. Запишите уравнения этих реакций. Найдите период полураспада $T_{1/2}$ изотопа $^{24}_{11}\mathrm{Na}$.
Ответ: $T_{1/2} = 157$ ч.

3.48 Запишите превращение нейтрона в протон и укажите, какие частицы при этом испускаются. Объясните, почему этот процесс является энергетически возможным.

3.49 Радон $^{222}_{86}\mathrm{Ra}$ – радиоактивный газ. Какую долю η полной энергии, освобождаемой при распаде радона, уносит α-частица? До распада ядро считать покоящимся. Напишите уравнение реакции.
Ответ: η = 0,98.

3.50 При осуществлении термоядерной реакции синтеза ядра гелия из ядер изотопов водорода по схеме $^{2}_{1}\mathrm{He} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n$, освобождается энергия $E = 17{,}6$ МэВ. Какая энергия E освободится при синтезе 1,0 г гелия?
Ответ: $E = 4{,}24 \cdot 10^{11}$ Дж.

3.51 При аннигиляции медленно движущихся электрона и позитрона образуются два γ-кванта. Под каким углом θ друг к другу они разлетаются? Какова частота ν возникающего излучения?
Ответ: $\theta = \pi$; $\nu = 1{,}2 \cdot 10^{20}$ Гц.

3.52 Известен период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа. Определите среднее время жизни τ ядра.
Ответ: $\tau = T_{1/2}/\ln 2$

9−10 баллов

3.53 Мишень из ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$ подвергают бомбардировке нейтронами. Какова кинетическая энергия E_n этих нейтронов, если в направлении движения нейтронов вылетают α-частицы с кинетической энергией E_α = 3,00 МэВ? Энергией испускаемых γ-квантов пренебречь.
Ответ: E_n = 0,61 МэВ.

3.54 Летевшая со скоростью $v = 0{,}8c$ нейтральная частица распадается на два фотона, движущихся в противоположных направлениях. Каково отношение n частот этих квантов?
Ответ: n = 9.

3.55 В ядерной реакции ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma$ образуется медленно движущаяся (по сравнению со скоростью света) α-частица и γ-квант с энергией E = 19,7 МэВ. Пренебрегая скоростям вступающих в реакцию ядер, найти скорость v_α образующейся α-частицы. Энергия покоя α-частицы E_0 = 3 730 МэВ.
Ответ: v_α = 1 580 км/с.

3.56 В термоядерной реакции ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}p$ в каждом акте выделяется энергия E = 18,4 МэВ. Какая энергия E выделится в реакции ${}^{3}_{2}\mathrm{H} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{1}p$, если дефект массы ядра

${}^{3}_{2}\mathrm{He}$ на 0,0060 а.е.м. больше, чем у ядра ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$? Одной атомной единице массы соответствует энергия E = 931,5 МэВ.
Ответ: *E* = 12,8 МэВ.

3.57 В результате термоядерной реакции ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n$ выделяется энергия. Какую часть η выделившейся энергии уносит нейтрон? Кинетическую энергию ядер дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ и трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ не учитывать. Различием масс нейтрона и протона пренебречь.
Ответ: η = 0,80.

3.58 Оцените температуру T водородной плазмы, при которой становится возможным преодоление электростатического барьера отталкивания между протонами. Для оценки принять, что минимальное расстояние, при котором начинается синтез ядер, $r \sim 10^{-14}$ м.

Ответ: $T = 1{,}0 \cdot 10^{9}$ К.

4. ЗАДАЧИ-ОЦЕНКИ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Решение физических задач – необходимая практическая основа, обеспечивающая качественное усвоение учебного материала. Такая деятельность приобщает студента к самостоятельной творческой работе, учит выделять главное, анализировать явления. Благодаря этому студент приобретает навыки научного исследования. Особенно этому способствует решение задач-оценок, а также качественных задач.

При подборе таких задач мы руководствовались следующими принципами. Любая исследовательская задача, как правило, описывает один или несколько процессов. Именно поэтому решение следует начинать с анализа того, что является объектом исследования. Далее надо выяснить, какие физические величины определяют явление и каково направление развития процесса. И только потом можно установить, каким физическим законам подчиняются явления, описанные в задаче. На этой основе разрабатывается физическая модель для решения задачи, подбираются значения физических параметров, входящих в модель. Это и будет обусловливать оптимальный путь решения задачи.

Конечно, мы не можем предложить универсальный путь решения содержащихся в этом разделе задач, но подробный анализ их содержания поможет студенту освоить методику ее решения.

В качестве примеров приведены и разобраны решения нескольких задач, которые позволят студенту проследить логику рассуждений при выборе способа решения конкретной задачи.

Примеры решения задач

Задача 1. Тонкий однородный гибкий шнур массой m_0 и длиной l_0 закреплен так, что нижним концом он касается горизонтального стола (рис. 4.1). Верхний конец шнура освобождают. Найдите силу давления шнура на стол в процессе падения, выразив ее в виде функции длины части шнура лежащей на столе и функции времени.

Дано: m_0; l_0; g **Найти**: F	**Анализ условия задачи и ее решение.** Если бы стол отсутствовал, то шнур после освобождения верхнего конца свободно бы падал, то есть все элементы шнура имели бы одинаковые скорости и двигались бы с ускорением $\vec{a} = \vec{g}$. При этом не возникало бы никаких деформаций и натяжений в шнуре.

При падении нижнего края шнура на стол можно считать, что свободная вертикальная часть шнура будет продолжать двигаться так же, как если бы стола не было.

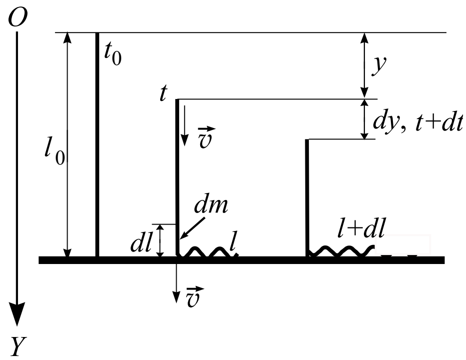


Рис. 4.1

При падении шнура на стол длина лежащей на столе части шнура l постоянно возрастает, и при этом каждый новый элемент dl, соприкасающийся со столом, полностью теряет скорость, которую он приобрел за время свободного падения. Будем считать удар шнура о стол абсолютно неупругим.

Поскольку импульс каждого элемента шнура изменяется, то по этому изменению можно найти силу $\vec{f}$, с которой каждый элемент шнура dl давит на стол в процессе удара. Для нахождения полной силы давления шнура на стол необходимо учесть вес лежащей на столе части шнура, который по модулю будет равен силе тяжести $m\vec{g}$ лежащей на столе части шнура. Таким образом, полная сила давления шнура на стол

$$\vec{F} = \vec{f} + m\vec{g}. \qquad (4.1)$$

Для определения силы $\vec{f}$ необходимо определить импульс, приобретаемый элементом dl шнура за время его свободного падения до удара о стол. Выберем направление оси OY так, как показано на рис. 4.1, поместив начало координат в точку подвеса шнура. При смещении верхнего конца шнура вниз на расстояние y скорость любой точки вертикальной части шнура

$$v = gt = \sqrt{2gy}, \tag{4.2}$$

где y – расстояние, пройденное верхним концом шнура за время t.

Из рис. 4.1 видно, что

$$dy = dl.$$

Тогда сила реакции, действующая на элемент dl шнура со стороны стола, определяется как

$$\vec{f}_1 = \frac{d\vec{p}}{dt},$$

где $d\vec{p}$ – изменение импульса элемента шнура dl за время dt неупругого удара.

Сила, действующая на стол со стороны элемента dl шнура, согласно третьему закону Ньютона

$$\vec{f} = -\vec{f}_1$$

или

$$\vec{f} = -\frac{d\vec{p}}{dt}. \tag{4.3}$$

Изменение импульса при ударе элемента dl шнура массой dm

$$d\vec{p} = -dm\vec{v},$$

где dm – масса элемента шнура длиной dl;

$\vec{v}$ – скорость, которой обладает элемент шнура перед ударом в момент времени t.

Знак «–» возникает из-за того, что импульс элемента шнура после удара равен нулю.

Запишем уравнение (4.3) в проекциях на ось OY

$$f_y = f = -\frac{dp_y}{dt}. \tag{4.4}$$

Так как $dl = dy$, то масса элемента шнура

$$dm = \gamma dy = \left(\frac{m_0}{l_0}\right)dy,$$

где γ – линейная плотность шнура, которая постоянна по величине, так как шнур однороден.

Учитывая формулу (4.2), запишем изменение проекции импульса на ось OY за время dt

$$dp_y = -dmv = -\gamma\sqrt{2gy}dy. \tag{4.5}$$

Подставляя выражение (4.5) в формулу (4.4), получим

$$f = \gamma\sqrt{2gy}\frac{dy}{dt}, \tag{4.6}$$

где $\dfrac{dy}{dt}$ – скорость произвольного элемента вертикальной части шнура.

Тогда, если еще раз учесть выражение (4.2), можно записать

$$f = 2\gamma gy. \tag{4.7}$$

Еще раз отметим, что в формуле (4.7) y – это расстояние, пройденное верхним концом шнура за время t.

Записав уравнение (4.1) в проекции на ось OY и учитывая выражения (4.5) и (4.6), получим

$$F = 3mg = 3\left(\frac{m_0}{l_0}\right)gl. \tag{4.8}$$

Из выражения (4.8) следует, что сила давления шнура на стол втрое больше силы тяжести той части шнура, которая к этому моменту уже лежит на столе.

Воспользовавшись еще раз формулой (4.7) и учитывая, что $l = y$, из выражения (4.8) получим

$$F = 3\gamma g y.$$

Так как в любой момент времени каждый элемент шнура совершает свободное падение, то

$$y = \frac{gt^2}{2}.$$

Тогда

$$F = \frac{3}{2}\gamma g^2 t^2 = \frac{3}{2l_0} m_0 g^2 t^2.$$

Отсюда видно, что во время падения шнура сила давления на стол растет пропорционально квадрату его времени падения.

Ответ: $\boldsymbol{F = \frac{3}{2l_0} m_0 g^2 t^2}$ **при** $\boldsymbol{t \le \sqrt{\frac{2l_0}{g}}}$**.**

Задача 2. Оцените, как изменится кинетическая энергия, если угловая скорость вращения Земли относительно собственной оси уменьшилась настолько, что продолжительность земных суток возросла на $\Delta T = 1{,}0$ с. Радиус Земли $R_З = 6{,}4 \cdot 10^6$ м, масса Земли $M_З = 6{,}0 \cdot 10^{24}$ кг.

Дано:
$\Delta T = 1{,}0$ с;
$M_З = 6{,}0 \cdot 10^{24}$ кг;

Анализ и решение задачи. При проведении оценки изменения кинетической энергии вращение Земли будем рассматривать как враще-

$R_З = 6{,}4 \cdot 10^6$ м; $T = 8{,}64 \cdot 10^4$ с	ние твердого тела в виде однородного шара вокруг оси, проходящей через центр шара и не испытывающей прецессию. Отклонением формы поверхности Земли от сферической пренебрегаем.
Найти: $\Delta E_к$.	

Величина момента инерции Земли I определяется выражением для момента инерции шара относительно оси, проходящей через центр масс шара с однородным распределением массы:

$$I = \frac{2}{5} M_З R_З^2. \tag{4.9}$$

Кинетическая энергия вращающегося твердого тела

$$E_к = \frac{I\omega^2}{2}, \tag{4.10}$$

где ω – угловая скорость равномерного вращения Земли

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \tag{4.11}$$

Изменение кинетической энергии при возрастании продолжительности суток на ΔT получим, используя выражения (4.9), (4.10) и (4.11):

$$\Delta E_к = \frac{I\omega_2^2}{2} - \frac{I\omega_1^2}{2},$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{T + \Delta T},$$

$$\Delta E_к = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} M_З R_З \left(\omega_1^2 - \omega_2^2\right) = \frac{1}{5} M_З R_З \left(\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{T + \Delta T}\right)^2 \right),$$

$$\Delta E_к = \frac{4\pi^2}{5} M_З R_З \left(\frac{1}{T^2} - \frac{1}{(T+\Delta T)^2} \right),$$

$$\Delta E_к = \frac{4\pi^2}{5} M_З R_З \left(\frac{\Delta T (2T + \Delta T)}{T^2 (T+\Delta T)^2} \right). \qquad (4.12)$$

Поскольку $\Delta T << T$, то

$$\Delta E_к = \frac{8}{5} \pi^2 M_З R_З^2 \frac{\Delta T}{T^3}.$$

Подставляя числовые значения в последнюю формулу, получим

$$\Delta E_к = \frac{8}{5} \cdot 3{,}14^2 \cdot 6{,}0 \cdot 10^{24} \cdot (6{,}4 \cdot 10^6)^2 \cdot \frac{1}{(86400)^3} = 6{,}0 \cdot 10^{24} \text{ Дж}.$$

Ответ: энергия уменьшается на $\Delta E_к = 6{,}0 \cdot 10^{24}$ Дж.

Задача 3. Оцените температуру T_1 корпуса самолета, летящего со скоростью звука. Скорость звука принять равной 330 м/с. Масса молекулы воздуха $m = 3{,}0 \cdot 10^{-26}$ кг. Температуру окружающей среды считать равной 0 °С.

Дано:
$m = 3{,}0 \cdot 10^{-26}$ кг;
$v = 330$ м/с;
$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
$T_0 = 273$ К;
$i = 5$

Найти: T_1

Анализ и решение задачи. При столкновении молекул воздуха с корпусом самолета происходит передача энергии. За счет этого температура корпуса самолета повышается. При равномерном полете самолета устанавливается термодинамическое равновесие между корпусом самолета и скользящими слоями окружающего воздуха. Поэтому можно предположить, что температура прилегающего воздушного слоя приблизительно равна температуре поверхности самолета. Тогда решение задачи состоит в следующем.

Средняя кинетическая энергия молекулы воздуха в системе отсчета, связанной с самолетом, определяется выражением

$$\overline{E}_1 = \frac{i}{2}kT_0 + \frac{mv^2}{2},$$

где i – число степеней свободы двухатомной молекулы воздуха ($i = 5$).

После столкновения с корпусом самолета молекула воздуха будет иметь среднюю кинетическую энергию, соответствующую температуре T_1 установившегося термодинамического равновесия:

$$\overline{E}_2 = \frac{5}{2}kT_1.$$

За счет разности энергий $\overline{E}_1 - \overline{E}_2$ повышается температура корпуса самолета, то есть выполняется неравенство

$$\frac{5}{2}kT_1 < \frac{5}{2}kT_0 + \frac{mv^2}{2}.$$

При установившемся термодинамическом равновесии

$$\frac{5}{2}kT_1 = \frac{5}{2}kT_0 + \frac{mv^2}{2},$$

откуда находим

$$T_1 = T_0 + \frac{1mv^2}{5k}.$$

Подставляя числовые данные, определяем температуру корпуса самолета

$$T_1 = 273 + \frac{1}{5} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-26} \cdot 330^2}{1,38 \cdot 10^{-23}} = 273 + 47,3 \approx 320\ \text{K}.$$

Ответ: $T_1 \approx 320$ К.

Задача 4. Оцените количество теплоты, переданное работающим холодильником мощностью $P = 200{,}0$ Вт окружающей среде при замораживании $m = 2{,}0$ кг воды. Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}32 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплоемкость воды $c_в = 4200$ Дж/(кг·К). Начальная температура воды $t_0 = 20$ °С. Оценочно время замерзания воды принять равным $\tau = 4$ ч.

Дано:
$P = 200$ Вт;
$m = 2{,}0$ кг;
$t_0 = 20$ °С;
$\lambda = 3{,}32 \cdot 10^5$ Дж/кг;
$\tau = 4$ ч $= 14400$ с;
$c_в = 4200$ Дж/(кг·К)

Найти: Q_1

Анализ и решение задачи. Так как холодильник работает по обратному термодинамическому циклу (рис. 4.2), то за счет совершаемой компрессором работы A холодильник отдает в окружающую среду большее количество теплоты Q_1, чем количество теплоты Q_2, отнимаемое у морозильной камеры.

Работа компрессора за время τ

$$A = P\tau.$$

Количество теплоты Q_2 передается морозильной камере при охлаждении и замерзании воды, так как при этих процессах теплота выделяется:

$$Q_2 = c_в m(20 - 0) + \lambda m.$$

Тогда по первому началу термодинамики имеем

$$Q_1 = A + Q_2,$$

$$Q_1 = P\tau + c_в m(20 - 0) + \lambda m.$$

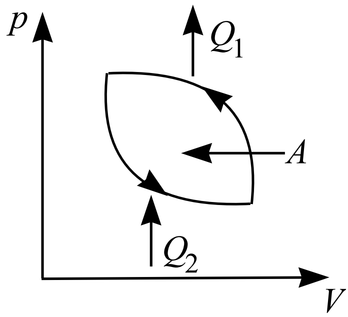


Рис. 4.2

Подставляем числовые данные

$$Q_1 = 200{,}0 \cdot 14400 + 4200 \cdot 2 \cdot 20 + 3{,}32 \cdot 10^5 \cdot 2 = 3{,}71 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Ответ: $\boldsymbol{Q_1 = 3{,}71 \cdot 10^6}$ **Дж.**

Задача 5. Оцените, насколько изменилась масса пружины при ее сжатии на 1,0 см. Коэффициент жесткости пружины k = 500,0 Н/м.

Дано:	**Анализ и решение задачи.** Начальная энергия пружины равна энергии покоя пружины
Δl = 1,0 см = 0,010 м; k = 500,0 Н/м; $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ м/с	$$E_0 = m_0 c^2,$$
Найти: Δm	где m_0 – масса покоя пружины.

Полная энергия пружины после сжатия складывается из энергии покоя пружины и энергии сжатой пружины:

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{k(\Delta l)^2}{2},$$

где m – масса пружины после сжатия.

Находим изменение массы пружины:

$$(m - m_0)c^2 = \frac{k(\Delta l)^2}{2},$$

$$\Delta m = m - m_0 = \frac{k(\Delta l)^2}{2c^2}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$\Delta m = \frac{500{,}0 \cdot 0{,}010^2}{2 \cdot 3{,}0 \cdot 10^8} = 2{,}8 \cdot 10^{-19} \text{ кг}.$$

Ответ: $\Delta m = 2{,}8 \cdot 10^{-19}$ кг.

Задача 6. В протонном ускорителе протоны приобретают кинетическую энергию $E_к = 6{,}4 \cdot 10^{-16}$ Дж. Узкий пучок протонов, выведенный из ускорителя, направляют на закрепленный металлический шар радиуса r (рис. 4.3), установленный далеко от ускорителя так, что центр шара не лежит на прямой 1, вдоль которой протоны вылетают из ускорителя. Расстояние от центра шара до этой прямой равно $d = \dfrac{r}{2}$. Оцените величину потенциала φ, достигнутую шаром после достаточно долгой работы ускорителя.

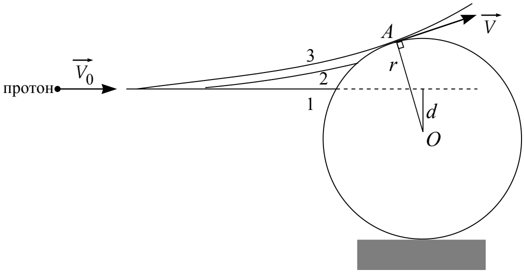


Рис. 4.3

Дано:	**Анализ и решение задачи.**
$E_к = 6{,}4 \cdot 10^{-16}$ Дж; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $d = \dfrac{r}{2}$	
Найти: φ	

Анализ и решение задачи. Каждый новый протон, попадающий на металлический шар, увеличивает его заряд, а следовательно, потенциал и напряженность электрического поля. С ростом напряженности электрического поля возрастает сила отталкивания, действующая на бомбардирующие шар протоны. Поэтому новые налетающие протоны начинают двигаться по искривленной траектории *2* (рис. 4.3), затем по траектории *3*, проходящей вблизи поверхности шара, не передавая шару заряд. Процесс электризации шара прекращается, и потенциал шара не повышается.

Для оценки потенциала воспользуемся законом сохранения энергии системы, состоящей из протона и заряженного шара:

$$\frac{mv_0^2}{2} = e\varphi + \frac{mv^2}{2}, \tag{4.13}$$

где e – заряд протона;

v_0 – начальная скорость протонов;

v – скорость протонов в точке A;

m – масса протона.

В начальный момент времени потенциальная энергия протона равна нулю, так как протон достаточно удален от шара. Сила электростатического поля шара, действующая на протоны, является центральной силой.

Поскольку взаимодействие между шаром и протоном обусловлено центральной силой, то можно воспользоваться законом сохранения момента импульса протона относительно центра шара:

$$mv_0 d = mvr,$$

$$v_0 d = vr,$$

$$v = \frac{v_0 d}{r}. \tag{4.14}$$

Подставив выражение (4.14) в (4.13), получим

$$\frac{mv_0^2}{2} = e\varphi + \frac{mv_0^2}{2}\left(\frac{d}{r}\right)^2. \tag{4.15}$$

Учтем, что начальная кинетическая энергия протона

$$E_{\text{к}} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Тогда выражение (4.15) примет вид

$$E_{\text{к}} = e\varphi + E_{\text{к}}\left(\frac{d}{r}\right)^2. \tag{4.16}$$

Из (4.16) получаем формулу для потенциала шара в виде

$$\varphi = \frac{E_{\text{к}}}{e}\left(1 - \frac{d^2}{r^2}\right).$$

Учитывая, что $d = \dfrac{r}{2}$, получаем

$$\varphi = \frac{E_к}{e}\left(1 - \frac{r^2}{4r^2}\right) = \frac{3E_к}{4e}.$$

Подставим числовые значения

$$\varphi = \frac{3 \cdot 6{,}4 \cdot 10^{-16}}{4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 3000\,\text{В}.$$

Ответ: φ = 3000 В.

Задача 7. Оцените частоту гармонических колебаний диполя в однородном электрическом поле, модуль напряженности которого $E = 3{,}0 \cdot 10^4$ В/м. Плечо диполя $l = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ м, заряд диполя $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса каждой заряженной частицы диполя $m = 1{,}0 \cdot 10^{-27}$ кг.

Дано:
$E = 3{,}0 \cdot 10^4$ В/м;
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
$l = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ м;
$m = 1{,}0 \cdot 10^{-27}$ кг

Найти: ν

Анализ и решение задачи. В положении устойчивого равновесия диполь располагается вдоль поля. Если диполь вывести из состояния равновесия, то возникает вращательный момент, стремящийся повернуть диполь вокруг его центра тяжести и сориентировать в направлении силовых линий напряженности электрического поля. Данный момент создают силы F_1 и F_2, действующие на заряды со стороны электрического поля.

Заряды совершают гармонические колебания, период которых определяется как

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{2a}},$$

где a – ускорение, которое электрическое поле сообщает каждому заряду диполя;

$\frac{l}{2}$ – расстояние от каждого из зарядов до оси вращения, проходящей через середину плеча диполя.

Тогда частота колебаний диполя может быть определена следующим образом:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{l}{2a}}}.$$

Так как

$$a = \frac{eE}{m},$$

то

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2eE}{lm}}.$$

Подставляем числовые данные и получаем

$$\nu = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14}\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{4}}{1{,}0 \cdot 10^{-10} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-27}}} = 4{,}9 \cdot 10^{10} \text{ Гц}.$$

Ответ: $\nu = 4{,}9 \cdot 10^{10}$ Гц.

Задача 8. Глаз человека реагирует на свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. При этом мощность, попадающего в него видимого излучения, составляет не менее $P = 2{,}3 \cdot 10^{-17}$ Вт. Оцените минимальное число фотонов, которые должны попадать в глаз за единицу времени.

Дано:	**Анализ и решение задачи.** Число фотонов N равно отношению энергии, попадающей в глаз за единицу времени, к энергии E_0 одного фотона:
$P \geq 2{,}3 \cdot 10^{-17}$ Вт; $\lambda = 500$ нм $= 5 \cdot 10^{-7}$ м; $c = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ м/с; $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
Найти: n	

$$N = \frac{Pt}{E_0},$$

$$E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$$N = \frac{P\lambda t}{hc}.$$

Тогда за единицу времени число фотонов n, попадающих в глаз,

$$n = \frac{N}{t} \geq \frac{2{,}3 \cdot 10^{-17} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}} \geq 58.$$

Ответ: $n \geq 58$.

Задача 9. Оцените ежегодное уменьшение массы Солнца за счет излучения. Экваториальный диаметр Солнца $d = 1{,}4 \cdot 10^9$ м.

Дано:	**Анализ и решение задачи.** Для проведения оценки ежегодного уменьшения массы Солнца будем считать, что Солнце представляет собой абсолютно черное тело. Энергетическая светимость R^* абсолютно черного тела определяется законом Стефана – Больцмана
$d = 1{,}4 \cdot 10^9$ м; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4); $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м·К; $t = 1$ год $= 31536000$ с; $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ м/с	
Найти: Δm	

$$R^* = \sigma T^4,$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана;

T – абсолютная температура поверхности Солнца.

Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела по закону смещения Вина, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

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

где b – постоянная Вина.

Максимум энергии излучения Солнца приходится примерно на длину волны $\lambda_{\max} = 470$ нм.

Из закона смещения Вина найдем температуру поверхности Солнца

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}}.$$

Энергию, излучаемую Солнцем, единицей площади за единицу времени определим по закону Стефана – Больцмана:

$$R^* = \sigma T^4 = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4. \qquad (4.17)$$

Определим энергию, излучаемую за год всей поверхностью S Солнца

$$E = R^* S t,$$

где t – время, равное одному году.

Так как $S = \pi d^2$, то с учетом выражения (4.17) имеем

$$E = \sigma \pi d^2 t \left(\frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4.$$

Из формулы Эйнштейна оценим годовую потерю массы Солнца в результате излучения

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{\sigma\pi d^2 t}{c^2}\left(\frac{b}{\lambda_{\max}}\right)^4,$$

$$\Delta m = \frac{5,67\cdot 10^{-8}\cdot 3,14\cdot 1,4^2\cdot 10^{18}\cdot 2,9^4\cdot 10^{-12}\cdot 3,1536\cdot 10^7}{9,0\cdot 10^{16}\cdot 470^4\cdot 10^{-36}} =$$

$$= 1,8\cdot 10^{17}\text{ кг.}$$

Ответ: Δm = 1,8 · 10^{17} кг.

ЗАДАЧИ

4.1 Оцените, насколько дальше спортсмен бросит гранату, если он будет бросать ее с разбега.

Указание. Оцените дальность полета без разбега ($l \sim \frac{v_0^2}{g}$).

При разбеге гранате сообщается дополнительная горизонтальная составляющая скорости, а вертикальная составляющая практически не меняется, значит, не меняется высота и время полета.

Ответ. $\Delta l \approx$ 50 м.

4.2 Однородный тонкий негнущийся стержень весом P поддерживается в горизонтальном положении двумя вертикальными опорами у концов стержня. В момент времени $t = 0$ одна из опор выбивается. Найдите силу F, которая действует на вторую опору сразу же после выбивания первой опоры.

Указание. Запишите второй закон Ньютона для второй опоры $P - F = m\frac{d^2x}{dt^2}$, где x – смещение второй опоры. Затем воспользуйтесь уравнением динамики для вращательного движения $\frac{PL}{2} = I\frac{d^2\varphi}{dt^2}$, где I – момент инерции стержня относительно оси, проходящей через один из его концов; L – длина стержня. Воспользуйтесь тем, что угол поворота φ мал, определите $\frac{d^2\phi}{dt^2}$.

Ответ: *F* = *P*/4.

4.3 Имеются два цилиндра одинаковых размеров, изготовленных из одного материала. Один цилиндр сплошной. Второй цилиндр собран из двух цилиндров, вложенных один в другой почти без зазора (рис. 4.4). Масса внутреннего цилиндра существенно меньше массы внешнего цилиндра. Считать, что трение скольжения между внутренним и внешним цилиндрами отсутствует. Проанализируйте, какой из цилиндров будет быстрее скатываться без скольжения по одной и той же наклонной плоскости.

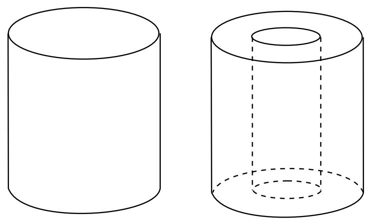


Рис. 4.4

Указание. Рассмотрите качение без скольжения как вращение вокруг мгновенной оси (образующей цилиндра, касающейся в данный момент наклонной плоскости) и поступательное движение этой оси. Вращающим моментом для обоих цилиндров является момент силы тяжести относительно мгновенной оси. Затем необходимо сравнить моменты инерции обоих цилиндров, учтя, что внутренний цилиндр вследствие отсутствия сил трения не вращается.

Ответ: сплошной цилиндр будет скатываться быстрее.

4.4 Цепочка содержит N одинаковых невесомых звеньев, скрепленных шарнирно (рис. 4.5). Пренебрегая трением, определите, какое натяжение должна выдержать нить, соединяющая точки *1* и *2*, если к цепочке подвешен груз массой m.

Указание. Воспользуйтесь тем, что сумма элементарных работ при бесконечно малых перемещениях системы равна нулю. На систему действуют силы натяжения нитей и силы тяжести.

Ответ: $\boldsymbol{T = Nmg}$.

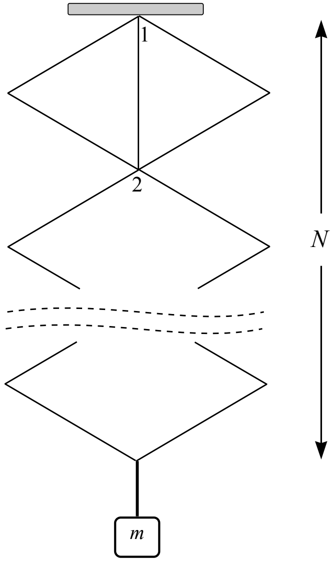


Рис. 4.5

4.5 В коробке *К* (рис. 4.6) заключен передающий механизм неизвестной конструкции. При повороте рукоятки *P* вертикальный винт *B* плавно поднимается. При одном полном обороте винт перемещается на расстояние *h* (радиус оборота принять равным *r*). На винт кладут груз массой *m*. Какую силу *F* надо приложить к ручке, чтобы удержать систему с грузом в равновесии?

Указание. Воспользуйтесь тем, что для равновесия любой механической системы сумма элементарных работ сил, действующих на систему при бесконечно малых перемещениях равна нулю. Запишите работу силы при бесконечно малом повороте на угол $d\varphi$. Найдите высоту поднятия груза dh для малого угла поворота $d\varphi$. Приравняйте работу по подъему груза на высоту dh и работу силы тяжести при подъеме груза на данную высоту. Из этого равенства найдите величину силы *F*.

Ответ: $\boldsymbol{F = mgh/2\pi r}$.

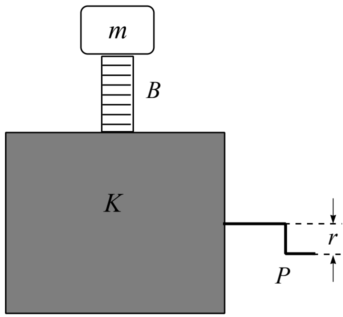


Рис. 4.6

4.6 В свинцовом шаре радиуса *R* сделана сферическая полость так, как показано на рис. 4.7. Масса свинцового шара без полости равна M. Используя закон всемирного тяготения, определите величину силы F, с которой свинцовый шар с по-лостью будет притягивать маленький шарик массой m. Маленький шарик находится на расстоянии d от центра свинцового шара на прямой линии, соединяющей центры шаров.

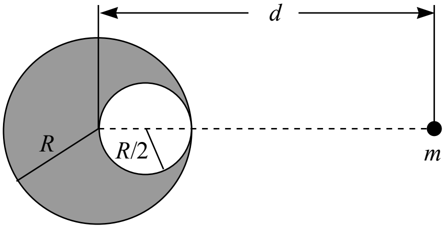


Рис. 4.7

Указание. Сила притяжения со стороны сплошного шара складывается из двух сил: силы притяжения шара со сферической полостью внутри и силы притяжения шара в форме полости радиусом $R/2$. Искомая сила равна разности сил притяжения сплошного шара и шара в форме полости.

Ответ: $$F = G\frac{Mm}{d^2} - G\frac{Mm}{8\left(d - \dfrac{R}{2}\right)^2}.$$

4.7 При игре в гандбол опытный игрок, когда ловит мяч, расслабляет руки и слегка подается назад вместе с мячом. Проанализируйте данную ситуацию.

Указание. Запишите выражение для средней силы, с которой мяч действует на руки игрока за время Δt, в течение которого мяч останавливается.

4.8 В сосуд налита жидкость, вязкостью которой можно пренебречь. Масса жидкости M, высота столба жидкости H (рис. 4.8). Сосуд соединен очень тонким шлангом с другим таким же сосудом. Первоначально вся жидкость была в первом сосуде. Потенциальная энергия жидкости в первоначальном положении составляла ½ MgH. Если открыть кран, то в некоторый момент времени потенциальная энергия системы оказалась равной ¼ MgH. Массой воды в соединительной трубке можно пренебречь. Объясните куда «исчезла» часть энергии.

Указание. Считайте, что потерь на трение нет.

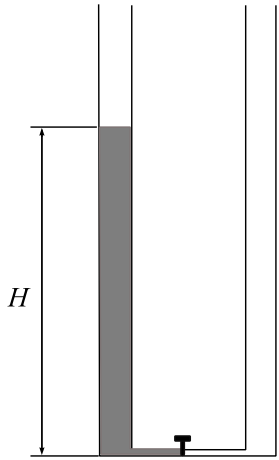


Рис. 4.8

4.9 Оцените время вытекания воды из заполненной ванны.

Указание. Среднюю скорость вытекания воды можно оценить как $\overline{v} \sim \sqrt{2gH}$, где H – высота уровня воды в ванне.

Ответ: $t \sim 3$ мин.

4.10 Оцените скорость опускания парашютиста с раскрытым парашютом.

Указание. Оцените массу воздуха, налетающего на летящий парашют за время Δt, и импульс, переданный этой массой воздуха парашюту. Отсюда можно оценить силу сопротивления воздуха.

Ответ: $v \sim 5$ м/с.

4.11 Бильярдный шар находится в точке A (рис. 4.9). Размеры бильярдного стола указаны на рисунке. Под каким углом надо направить шар, чтобы попасть в лузу B? Шар должен испытать отражение от двух бортов. Считайте, что при ударе о борт направление движения шара меняется по закону отражения, т. е. угол падения равен углу отражения.

Указание. Разложите скорость шара по направлениям сторон стола.

Ответ: $\boldsymbol{\alpha = \mathrm{arcctg}\left(\dfrac{2a - c}{2b}\right)}$.

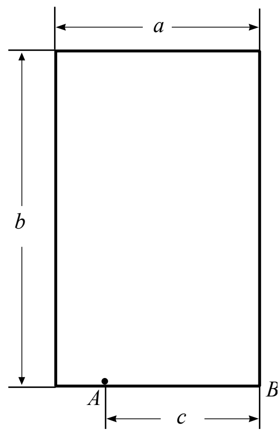


Рис. 4.9

4.12 Оцените выталкивающую силу, действующую на человека в воздухе.

Указание. Средняя плотность вещества человека близка к плотности воды.

Ответ: $F \sim 1$Н при массе человека $m \sim 75$ кг.

4.13 Почему в кино, когда автомобиль движется вперед, часто кажется, что его колеса вращаются назад?

Указание. Рассмотрите два случая, когда скорость вращения колес автомобиля несколько больше скорости смены кадров и когда скорость вращения колес меньше скорости смены кадров.

4.14 Тело движется равноускорено по прямой под действием постоянной силы, модуль которой F. Проанализируйте, как изменяется график модуля скорости движения, если модуль силы F начнет уменьшаться.

Указание. Рассмотрите, как будет изменяться ускорение тела. Это позволит нарисовать график зависимости скорости от времени.

4.15 В цилиндрическом ведре массой M, высотой H и площадью поперечного сечения S (рис. 4.10) насыпан песок, плотность которого ρ. Считая дно ведра невесомым, найдите зависимость частоты малых колебаний получившегося маятника от уровня песка в ведре.

Указание. Замените данный маятник математическим маятником, поместив всю массу песка в центр масс системы, положение которого определяется выражением

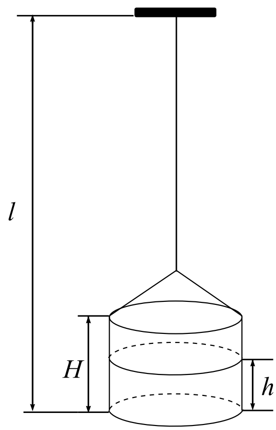


Рис. 4.10

$$l' = \frac{Ml_{в} + M_{п}l_{п}}{M + M_{п}},$$

где $l_в$ и $l_п$ – расстояния от точки подвеса до центров масс ведра и песка,

$M_п$ – масса песка.

Ответ: $\boldsymbol{\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l'}}}$, **где** $\boldsymbol{l'}$ **– расстояние от точки подвеса до центра масс системы** $\boldsymbol{l' = \dfrac{M\left(l - \dfrac{H}{2}\right) + \rho Sh\left(l - \dfrac{h}{2}\right)}{M + \rho Sh}}$.

4.16 Покажите, что свободные колебания маятника на нити в отсутствии сил сопротивления будут гармоническими.

Указание. Нарисуйте все силы, действующие на маятник. Найдите результирующую всех сил и разложите ее на две составляющие: касательную к траектории движения $\vec{F}_\tau$ и сообщающую центростремительное ускорение $\vec{F}_n$. Касательная составляющая $\vec{F}_\tau$ равнодействующей всех сил выступает в качестве возвращающей силы. Примените второй закон Ньютона.

Ответ: возвращающая сила пропорциональна смещению $\boldsymbol{\Delta\vec{r}}$ **:** $\boldsymbol{\vec{F}_\tau = -\frac{mg}{l}\Delta\vec{r}}$, **что и является условием совершения гармонических колебаний маятником.**

4.17 Если в Земле прорыть тоннель (рис. 4.11), то в таком тоннеле при отсутствии трения тело могло бы совершать гармонические колебания. Убедитесь в этом, произведя расчет, и найдите период таких колебаний в зависимости от длины тоннеля. Принять, что внутри Земли ускорение свободного падения $\vec{g} = -c\vec{r}$, где c – постоянная величина. Вращением Земли пренебречь.

Указание. Из соображений симметрии следует, что положение равновесия будет в точке O. Сместив тело на рассто-

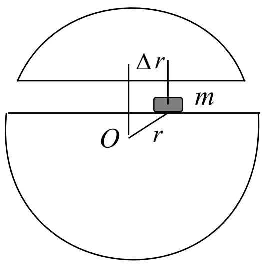


Рис. 4.11

яние Δr от положения равновесия, найдите возвращающую силу и покажите, что данная сила подчиняется закону Гука.

Ответ: $\boldsymbol{F = -mc\Delta r}$; $\boldsymbol{T = 2\pi\sqrt{\frac{1}{c}}}$.

4.18 Сосуд с газом в форме прямоугольного параллелепипеда движется в направлении, перпендикулярном одной из его стенок (рис. 4.12). Найдите разность плотностей у его задней $\rho_з$ и передней $\rho_п$ стенок, если сосуд достаточно долго движется с ускорением a. Плотность покоящегося газа ρ_0, масса газа m, молярная масса газа M, температура газа T, длина сосуда l. Силой тяжести, действующей на газ, пренебречь.

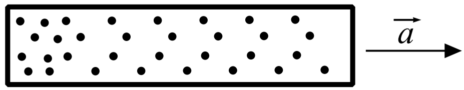


Рис. 4.12

Указание. Для нахождения плотностей $\rho_з$ и $\rho_п$ следует рассмотреть такие тонкие слои газа около стенок, чтобы в пределах слоя плотность газа была практически постоянной. Разность давлений газа у передней и задней стенок сосуда найдем из уравнений движения газа как целого. Полагаем, что за длительное время движения колебания газа затухнут из-за внутреннего трения и все части газа будут иметь одинаковые ускорения a.

Ответ: $\boldsymbol{\rho_з - \rho_п = \frac{\rho_0 laM}{RT}}$.

4.19 Осветительная лампочка, имеющая тонкостенный непрочный баллон, заполняется инертным газом. Из каких соображений выбирают величину давления газа для заполнения лампочки? Оцените величину этого давления.

Указание. Объем и масса газа в баллоне сохраняются. Следовательно, примените закон Шарля. Давление внутри выключенной лампочки следует выбрать таким, чтобы при включении лампочки поднявшееся давление нагретого газа сравнялось с внешним атмосферным давлением.

Ответ: $\boldsymbol{p \sim 0{,}7 \cdot 10^5}$ **Па.**

4.20 На подоконнике была оставлена на ночь банка с мутной водой. К утру муть осталась только у той стенки, которая была обращена к комнате. В какое время года происходил этот опыт?
Указание. Учтите неравномерное нагревание банки, а следовательно, существование конвекционных процессов, которые направлены от холодной стенки к теплой.
Ответ: зима.

4.21 Два цилиндра одинаковых размеров – железный и серебряный – стоят один на другом (рис. 4.13). Нижнее основание серебряного цилиндра имеет температуру t_1 = 0 °C, верхнее основание железного цилиндра поддерживается при температуре t_2 = 100°C. Теплопроводность серебра в 11 раз больше теплопроводности железа. Чему равна температура t_3 соприкасающихся оснований? Считать, что через боковые поверхности цилиндров тепло не уходит в окружающую среду.

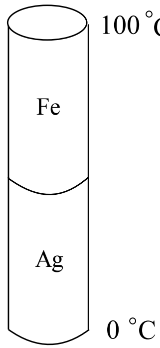


Рис. 4.13

Указание. В установившемся состоянии количество тепла, протекающего за единицу времени через любое сечение, будет одинаково. Найдите количество тепла, протекающего через любое сечение железного и серебряного цилиндров, и приравняйте их.
Ответ: t_3 = 8,3 °C.

4.22 Кусок металла и кусок дерева имеют одинаковую температуру. Почему на ощупь металл кажется холоднее дерева? При какой температуре металл и дерево будут казаться на ощупь одинаково нагретыми?
Указание. Учтите, что теплопроводность у металла больше, чем у дерева.

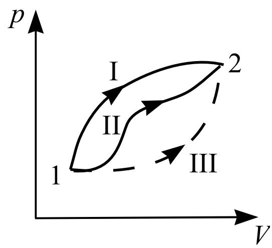


Рис. 4.14

4.23 На рис. 4.14 изображены три процесса, переводящие систему из равновесного состояния *1* в другое равновесное состояние *2*. Процессы I и II квазистати-

ческие, а процесс III не квазистатический. Сравните приращение энтропии системы при протекании процессов I, II и III.
Указание. Следует учесть, что энтропия – функция состояния.
Ответ: $\boldsymbol{\Delta S_{\mathrm{I}} = \Delta S_{\mathrm{II}} = \Delta S_{\mathrm{III}}}$**.**

4.24 На рис. 4.15 изображен циклический процесс, осуществленный с рабочим телом в некотором устройстве. Какое это устройство – холодильник или тепловая машина?
Ответ: холодильник.

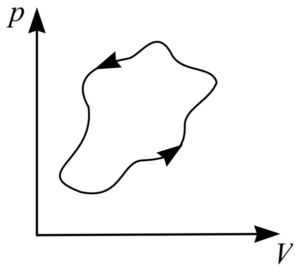


Рис. 4.15

4.25 Для того чтобы быстрее нагреть кастрюлю с водой, нагреватель всегда помещают внизу. Если надо охладить кастрюлю с водой как можно быстрее, хозяйка поставила ее на лед. Правильно ли это?
Ответ: нет.

4.26 Показать, что если бы не существовало давления электромагнитного излучения, то можно было бы построить вечный двигатель второго рода. В качестве модели взять два абсолютно черных тела A и B, нагретых до постоянных температур T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) соответственно, соединенных между собой пустым цилиндром с белыми стенками. В начале и в конце цилиндра имеются щели для того, чтобы можно было вставить поршни с зеркальными стенками (рис. 4.16).

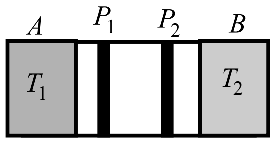


Рис. 4.16

Указание. Удаляем из цилиндра поршень P_2, оставив поршень P_1 у самой поверхности тела A; цилиндр наполняется равновесным излучением от тела B. Затем вынимаем поршень P_1, вставляем поршень P_2 и двигаем его до соприкосновения с телом A. Далее вынимаем поршень P_2 и вставляем P_1 у поверхности тела B, двигаем его до тела A и т. д.

4.27 На горячую песчаную баню ставится высокий химический стакан, на дно которого налит слой анилина, а сверху –

большое количество воды. Через некоторое время капля анилина поднимается к поверхности воды, совершая работу против сил тяжести, а потом снова падает на дно. Как объяснить такое движение капли и не противоречит ли оно второму началу термодинамики о невозможности периодического совершения работы за счет теплоты только от одного теплоисточника?

Указание. Анилин тяжелее воды, но вследствие большого теплового расширения он становится легче воды.

4.28 Выведите формулу Стокса с помощью теории анализа размерностей в предположении, что сила сопротивления не зависит от плотности жидкости.

Указание. Запишите размерность силы, вязкости, скорости и радиуса сферы. Затем запишите выражение $F=[\eta]^{\alpha}[r]^{\beta}[v]^{\gamma}$ и приравняйте размерности.

4.29 Если маятниковые часы поднять на большую высоту, то будут ли они спешить или отставать по отношению к таким же часам, находящимся на поверхности Земли?

Указание. Момент инерции маятника часов на поверхности Земли несколько больше по сравнению со своим значением в вакууме, потому что из-за вязкости воздуха маятник вовлекает в движение окружающий его воздух.

Ответ: часы будут спешить.

4.30 Покажите, что при малых скоростях при установившемся падении шарика в вязкой жидкости скорость падения шарика пропорциональна квадрату его радиуса. Плотность материала шарика ρ, плотность жидкости ρ_1, коэффициент вязкости жидкости η, радиус шарика r.

Указание. Для шара, движущегося в вязкой жидкости, справедлив закон Стокса $F=6\pi\eta r v$, где F – сила сопротивления движению шарика; v – скорость движения шарика.

Ответ: $\boldsymbol{v=\dfrac{2(\rho-\rho_1)gr^2}{9\eta}}$.

4.31 Космонавт после выхода корабля на орбиту обнаружил, что в закупоренной бутылке с водой весь воздух, находящийся в бутылке, собрался внутри воды в виде шара, а вода заполнила бутылку до пробки. Как это объяснить?

Указание. Вода полностью смачивает стенки бутылки.

4.32 Возможно ли создать такое электростатическое поле, вектор напряженности которого во всех точках поля имеет одинаковое направление и перпендикулярно к этому направлению изменяет свою величину по линейному закону?

Указание. Выберите в этом поле соответствующий контур и воспользуйтесь тем, что электрическое поле – поле потенциальное, т. е. работа при перемещении заряда по замкнутому контуру равна нулю.

Ответ: невозможно.

4.33 Будем считать, что вся масса электрона m_0 обусловлена энергией его электрического поля. Принимая это положение, оцените «классический радиус электрона».

Указание. Воспользуйтесь тем, что энергия покоя электрона равна m_0c^2.

Ответ: $\boldsymbol{r \approx \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m_0 c^2} \approx 3\cdot 10^{-15}}$ **м.**

4.34 Потенциал трех точек, расположенных недалеко друг от друга, одинаков. Как направлены векторы напряженности электростатического поля в окрестности этих точек?

Указание. Учтите ортогональность линий напряженности электростатического поля к эквипотенциальным поверхностям.

4.35 Оцените температуру T водородной плазмы, при которой становится возможным преодоление электростатического барьера между протонами.

Указание. Принять, что минимальное расстояние, при котором начинается синтез ядер, $r \sim 10^{-14}$ м.

Ответ: $\boldsymbol{T \sim \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 kr} \sim 10^9}$ **К.**

4.36 Постоянным током называется ток, величина и направление которого на данном промежутке времени не меняются. Для металлического проводника выражение для силы тока можно записать в виде $I = enlvS$, где e – заряд электрона; n – концентрация электронов в проводнике; l и S – длина и площадь поперечного сечения проводника; v – средняя скорость направленного движения электронов. Этот ток будет постоянным при постоянной средней скорости движения электронов v, т. е. при отсутствии ускорения ($\vec{a} = 0$). Однако на электроны со стороны постоянного электрического поля действует постоянная сила $\vec{F} = e\vec{E}$, которая должна сообщать электронам ускорение $\vec{a} \neq 0$. Следовательно, постоянный электрический ток невозможен. Обоснуйте, в чем ошибочность данного утверждения.

Указание. Кроме внешнего электрического поля, электроны испытывают влияние как ионов в узлах кристаллической решетки металла, так и взаимодействие с другими электронами.

4.37 К проволоке, имеющей форму окружности, к двум произвольным точкам A и B приложена постоянная разность потенциалов, вследствие чего по дугам AMB и ANB (рис. 4.17) идут токи. Чему равна величина индукции магнитного поля в центре окружности в точке O?

Указание. Воспользуйтесь законом Био – Савара – Лапласа и тем, что сопротивление участков AMB и ANB пропорционально длинам этих участков.

Ответ: $B = 0$.

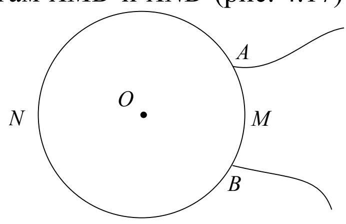


Рис. 4.17

4.38 Прямолинейный проводник начинает двигаться с возрастающей скоростью, пересекая силовые линии однородного магнитного поля, которое направлено перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 4.18). В одном случае концы проводника замкнуты омическим сопротивлением R, а во втором – омическим сопротивлением R и катушкой индуктивности L, включенной последовательно с омическим сопротивлением. Проводники совершают одинаковые перемещения. Проанализируйте, в каком из этих случаев совершится бо́льшая работа.

Указание. Учесть, что во втором случае возникает явление самоиндукции. Учесть правило Ленца.

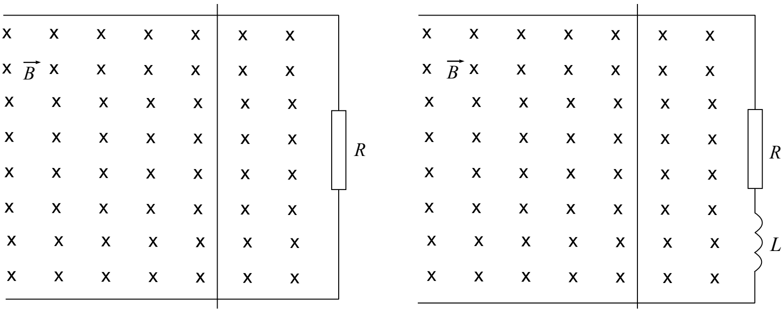


Рис. 4.18.

4.39 Знаменитый английский физик М. Фарадей в 1831 г. открыл явление электромагнитной индукции. Одновременно с Фарадеем в этом направлении работал швейцарский физик Ж.-Д. Колладон. В опытах Колладона применялся гальванометр, в котором легкая стрелка подвешивалась внутри катушки и по отклонению стрелки можно было судить о наличии тока в катушке. Для этого гальванометра неизбежно влияние магнита, перемещаемого вблизи гальванометра. Колладон соединял концы соленоида с гальванометром, который для устранения непосредственного влияния магнита был вынесен в соседнюю комнату, двигал магнит в соленоид и шел в соседнюю комнату смотреть, что показывал гальванометр. В чем была ошибка ученого? Почему ему не удалось открыть явление электромагнитной индукции?

Указание. Проанализируйте, когда проявляется явление электромагнитной индукции.

4.40 Если водитель трамвая на полном ходу выключит напряжение на входных клеммах мотора и соединит их накоротко, то вагон быстро остановится. Почему?

Указание. При выключении внешнего напряжения мотор с быстровращающимся якорем превращается в динамо-машину, создающую сильный ток.

4.41 На замкнутый железный сердечник намотаны две обмотки (рис. 4.19). Как определить число витков в каждой из обмоток, если в распоряжении имеются источник переменного тока, провода, вольтметры любой чувствительности?

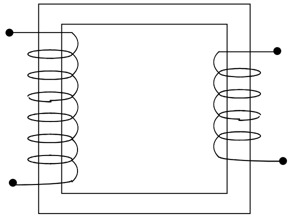


Рис. 4.19

Указание. Подключите одну из обмоток к источнику переменного тока и измерьте напряжения на концах обеих обмоток. Используя провод, намотайте на сердечник дополнительную обмотку, имеющую известное число витков.

4.42 Между источником света и экраном находится двояковыпуклая линза с фокусным расстоянием F. Расстояние от источника до экрана меньше $4F$. Известно, что при этих условиях нельзя получить на экране изображение источника ни при каком положении линзы. Найдите способ, как с помощью простых средств, не двигая ни линзы, ни экрана, получить изображение источника на экране.
Указание. Используйте зеркало и непрозрачный экран.

4.43 Луч света падает на однородный прозрачный стеклянный шар и проникает внутрь шара, где достигает в точке A поверхности раздела стекло-воздух (рис. 4.20). Проанализируйте, может ли в этой точке произойти полное внутреннее отражение.
Указание. Используйте свойство обратимости хода световых лучей.
Ответ: нет.

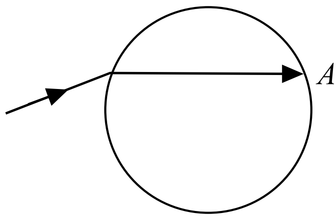


Рис. 4.20

4.44 Для того чтобы защитить себя от жара раскаленной печи, следует поместить перед ней лист стекла, а не лист эбонита. Это объясняется тем, что стекло слабо пропускает тепловые (инфракрасные) лучи, а эбонит для них прозрачен. Поясните, почему теплицы покрывают стеклом, а не эбонитом.

Указание. Учтите, что в солнечном спектре наибольшее количество энергии приходится на видимую область спектра, которая стеклом пропускается.

4.45 Найдите энтропию и теплоемкость излучения абсолютно черного тела, объем которого равен V.

Указание. Воспользуйтесь формулой Рэлея – Джинса $r_{\lambda,T} = \frac{c}{4} w$, где w – объемная плотность энергии.

Ответ: $\mathbf{S = \frac{16}{3c} \sigma T^3 V}$; $\mathbf{C_V = \frac{16}{c} \sigma T^3 V}$.

4.46 Определите уравнение адиабатического процесса, производимого с равновесным тепловым излучением.

Указание. Найдите энтропию равновесного излучения и из этого выражения получите уравнение адиабатического процесса.

Ответ: $\mathbf{VT^3 = const}$.

4.47 При освещении катода фотоэлемента монохроматической световой волной в его цепи течет ток насыщения $I_Н$. Изобразите зависимость тока насыщения $I_Н$ от концентрации падающих на катод фотонов. От какого параметра зависит тангенс угла наклона графика к оси абсцисс?

Указание. Воспользоваться понятием квантового выхода фотоэффекта, т. е. числом фотоэлектронов, приходящихся на один падающий фотон.

4.48 Работа выхода для вольфрама равна 4,25 эВ, для бария – 2,5 эВ. Оцените, пригодны ли эти металлы для использования в фотоэлементе при облучении видимым светом.

Указание. Найдите максимальные длины волн света, которые могут вызвать эмиссию фотоэлектронов из вольфрама и бария.

4.49 Аргоновый лазер излучает свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм, который сфокусирован на плоском фотокатоде в пятно диаметром $d = 0{,}10$ мм. На анод, расположенный на расстоянии $l = 3{,}0$ см от катода, подано напряжение $U = 4{,}0$ кВ. Анод считать плоским и расположенным параллельно поверхности катода. Работу выхода электронов из вещества катода A принять равной 2,0 эВ.

Указание. На край пятна на аноде попадут электроны, вылетевшие из края пятна на катоде и имеющие скорость, направленную параллельно поверхностям катода и анода.

Ответ: $\boldsymbol{D \approx 1{,}3}$ **мм.**

4.50 Первый потенциал возбуждения атома водорода равен $\varphi_1 = 10{,}2$ В. Оцените температуру T, при которой средняя кинетическая энергия атомов водорода, содержащихся в его парах, равна энергии возбуждения.

Указание. Используйте толкование молекулярно-кинетической теории газов об абсолютной температуре.

Ответ: $\mathbf{T = \dfrac{2e\varphi_1}{3k} = 1{,}6 \cdot 10^4\ K.}$

4.51 Покажите, исходя из законов сохранения, что покоящийся свободный электрон не может поглотить падающий на него фотон.

Указание. Запишите законы сохранения энергии и импульса для системы «фотон – свободный электрон» и убедитесь, что система уравнений имеет решение только для нулевой частоты фотона.

4.52 Для объяснения природы ядерных сил Х. Юкава предположил существование частицы с отличной от нуля массой покоя – мюона. Получите соотношение между радиусом действия ядерных сил и массой мюона.

Указание. Воспользоваться соотношением неопределенности и учесть, что когда мюон излучается одним нуклоном и поглощается другим, то его координата остается неопределенной с погрешностью, равной расстоянию между взаимодействующими нуклонами, т. е. радиусу действия ядерных сил.

Ответ: $\boldsymbol{R \approx \dfrac{\hbar}{mc}}$**.**

4.53 Электрон находится в состоянии с минимальной энергией в прямоугольной, бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 0,10 нм. Оцените давление частицы на стенки ямы.
Указание. Связать энергию частицы с ее импульсом, найти изменение импульса частицы, используя соотношение неопределенностей для координат и проекций импульсов. Для нахождения силы определить время столкновения со стенкой ямы из соотношения неопределенности для энергии и времени.

Ответ: $\boldsymbol{p \sim \frac{3\pi\hbar}{2me} \sim 10^{-7}}$ **Па.**

4.54 Частица массы m находится в одномерной потенциальной яме $U(x) = \frac{kx^2}{2}$ (гармонический осциллятор). Установите зависимость минимально возможной энергии частицы от размера x области ее нахождения.
Указание. Используйте соотношение неопределенности для координаты и проекции импульса.

Ответ: $\boldsymbol{E_{\min} \sim \frac{\hbar^2}{2mx^2} + \frac{kx^2}{2}}$**.**

4.55 Воспользовавшись значением энергии, полученным при решении уравнения Шредингера для одномерной бесконечно глубокой потенциальной ямы, оцените разность ΔE_n (эВ) для молекулы газа, приняв массу молекулы $m \sim 10^{-26}$ кг, линейный размер сосуда 10,0 см. Сравните полученную оценку со средней кинетической энергией молекул при комнатной температуре $T = 300$ К.

Ответ: 1) $\boldsymbol{\Delta E_n = E_{n+1} - E_n \sim \frac{\pi^2\hbar^2}{me^2} n \sim 10^{-20} n}$ **эВ (при** $\boldsymbol{n >> 1}$**);**

2) $\boldsymbol{3/2kT \sim 0{,}045}$ **эВ,** $\boldsymbol{\Delta E_n << 3/2kT}$**.**

4.56 Оцените электростатическую энергию W ядра, атомный номер которого Z, массовое число A. Ядро считайте однородно заряженным шаром радиуса $R = 1{,}3A^{1/3} \cdot 10^{-15}$ м. Оценку проведите для ядра урана с $Z = 92$, $A = 235$.

Ответ: $\boldsymbol{W = \dfrac{3Z^2e^2}{4\pi\varepsilon_0 R}}$ **Мэв. Для урана** $\boldsymbol{W}$ **= 910 Мэв.**

4.57 Известны энергии связи, приходящиеся на один нуклон, $\varepsilon_{св}$, $\varepsilon_{св1}$, $\varepsilon_{св2}$ ядер, участвующих в реакции ${}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}X_1 + {}^{A_{21}}_{Z_2}X_2$. Определите энергию ΔE, выделяющуюся в процессе деления.
Указание. Воспользуйтесь для вычисления формулой энергетического выхода ядерных реакций.
Ответ: $\boldsymbol{\Delta E = Mc^2 - (m_1 + m_2)c^2 = \varepsilon_{св1}A_1 + \varepsilon_{св2}A_2 - \varepsilon_{св}A}$**,**
где $\boldsymbol{M}$ **– масса материнского ядра,**
$\boldsymbol{m_1}$ **и** $\boldsymbol{m_2}$ **– массы дочерних ядер.**

4.58 Радиоактивный изотоп имеет период полураспада T. Определите: 1) вероятность dP распада ядра за интервал времени от t до $t + dt$; 2) вероятность $P(t)$ того, что ядро распадается за промежуток времени от 0 до t; 3) вероятность распада за промежуток времени, равный периоду полураспада; 4) вероятность распада ядра за промежуток времени, равный среднему времени жизни τ ядра.

Ответ: 1) $\boldsymbol{dP = \left(\dfrac{\ln 2}{T}\right)dt}$**; 2)** $\boldsymbol{P(t) = 1 - \exp\left(-\dfrac{\ln 2}{T}t\right)}$**;**

3) $\boldsymbol{P(t = T) = 1/2}$**; 4)** $\boldsymbol{P(t = \tau) = 1 - e^{-1} = 0{,}632}$**.**

4.59 Нужно ли учитывать волновые свойства α-частицы, энергия которой равна 2 МэВ, а ее положение определяется по следу, оставленному в камере Вильсона, ширина которого $\Delta x \sim 10^{-2}$ см?
Указание. Примите ширину следа за неопределенность координаты Δx в направлении, перпендикулярном следу.
Ответ: не нужно.

4.60 Вектор Умова – Пойнтинга показывает количество энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную поверхность, перпендикулярную направлению распространения волны. Найдите явное выражение указанного вектора $\vec{P}$ через амплитуду колебаний волны A, циклическую частоту колебаний ω, плотность среды ρ и скорость волны $\vec{u}$.

Указание. Примите, что в единице объема есть n колеблющихся осцилляторов, каждый из которых имеет энергию $W_1 = \dfrac{kA^2}{2}$, где $k = m\omega^2$; m – масса осциллятора.

Ответ: $\boldsymbol{\vec{P} = \dfrac{\rho\omega^2 A^2}{2}\vec{u}.}$

4.61 Используя результаты предыдущей задачи, покажите, что в однородной изотропной среде без поглощения для сферической волны амплитуда колебаний обратно пропорциональна расстоянию до источника.

Указание. Окружите источник волны двумя концентрическими сферами различных радиусов и учтите, что вследствие того, что среда не поглощает, количество энергии, прошедшее через эти две сферы, будет одинаковым. Затем запишите выражение для потока энергии через данные две сферы, используя вектор Умова – Пойнтинга.

Приложение 1

ДЕСЯТИЧНЫЕ ПРИСТАВКИ К НАЗВАНИЯМ ЕДИНИЦ

Множитель	Приставка		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^{9}	гига	Г	G
10^{6}	мега	М	M
10^{3}	кило	к	k
10^{2}	(гекто)	г	h
10^{1}	(дека)	да	da
10^{-1}	(деци)	д	d
10^{-2}	(санти)	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	µ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	A

Приложение 2

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Величина		Единица СИ		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			русское	международное
Длина	L	метр	м	m
Масса	M	килограмм	кг	kg
Время	T	секунда	с	s
Сила электрического тока	I	ампер	А	A
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	К	K
Количество вещества	N	моль	моль	mol
Сила света	J	кандела	кд	cd

Метр – единица длины, равная расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299792458 долей секунды.

Килограмм – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

Секунда – единица времени, равная 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер – сила тока, проходящего по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, который вызывает между этими проводниками взаимодействие силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Кельвин – единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль – единица количества вещества, равная количеству вещества системы, в которой содержится столько же структурных элементов (атомов, молекул, ионов, электронов и других. частиц или специфицированных групп частиц), сколько содержится атомов в углероде массой 0,012 кг.

Кандела – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частоты $540 \cdot 10^{12}$ Гц (540 ТГц), сила излучения которого в этом направлении составляет 1/638 Вт/ср.

ВЕЛИЧИНЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ

Величина	Обозначение	Значение
Атомная единица массы	1 а.е.м.	$1{,}6605655(86)\cdot10^{-27}$ кг
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}022045(31)\cdot10^{23}\ \dfrac{1}{\text{моль}}$
Постоянная Больцмана	$k = R/N_A$	$1{,}380662(44)\cdot10^{-23}\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Масса покоя α-частицы	m_α	$6{,}6951975\cdot10^{-27}$ кг
Элементарный заряд	e	$1{,}6021892\cdot10^{-19}$ Кл
Удельный заряд электрона	$-e/m$	$-1{,}7588047\cdot10^{11}$ Кл/кг
Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}6749543\cdot10^{-27}$ кг; 1,00867 а.е.м.
Масса покоя протона	m_p	$1{,}6726485\cdot10^{-27}$ кг; 1,00728 а.е.м.
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}109534\cdot10^{-31}$ кг; 0,00055 а.е.м.
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}85418782\cdot10^{-12}$ Ф/м
Постоянная Планка	h	$6{,}626176\cdot10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана−Больцмана	σ	$5{,}67032\cdot10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4)
Постоянная Ридберга	R	$1{,}097373177\cdot10^{7}$ м$^{-1}$
Скорость света в вакууме	c	$2{,}99792459\cdot10^{8}$ м/с
Энергия, соответствующая 1 а.е.м.		931,5016 МэВ

Приложение 4

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ε И ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ

Вещество	ε	n	Вещество	ε	n
Вода	81,0	1,33	Стекло	7,0	1,5–1,9
Глицерин	56,2	1,47	Сероуглерод	4,0	1,63
Керосин	2,0	1,448	Лед	3,25	1,33

Приложение 5

РАБОТА ВЫХОДА *A* ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

Металл	*A*, эВ	Металл	*A*, эВ
Алюминий	3,74	Кадмий	4,08
Барий	2,29	Медь	4,47
Литий	2,3	Молибден	4,27
Висмут	4,62	Натрий	2.27
Вольфрам	4,50	Никель	4,84
Железо	4,36	Платина	5,29
Золото	4,58	Серебро	4,28
Кобальт	4,25	Цезий	1,89
Калий	2,2	Цинк	3,74

ПЕРИОДЫ ПОЛУРАСПАДА НЕКОТОРЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Изотоп	Символ	$T_{1/2}$
Актиний	$^{225}_{89}Ac$	10 сут.
Йод	$^{131}_{53}I$	8 сут.
Иридий	$^{192}_{77}Ir$	75 сут.
Кобальт	$^{60}_{27}Co$	5,3 года
Магний	$^{27}_{12}Mg$	10 мин.
Полоний	$^{210}_{84}Po$	538 сут.
Радий	$^{219}_{88}Ra$	10^{-3} с
Радий	$^{226}_{88}Ra$	1620 лет
Радон	$^{222}_{88}Rn$	3,8 дня
Стронций	$^{90}_{38}Sr$	28 лет
Торий	$^{229}_{90}Th$	7 000 лет
Уран	$^{235}_{92}U$	$7{,}1\cdot10^{8}$ лет
Уран	$^{238}_{92}U$	$4{,}5\cdot10^{9}$ лет
Фосфор	$^{32}_{15}P$	14,3 лет
Плутоний	$^{239}_{94}Pu$	24,4 года

Приложение 7

МАССЫ НЕКОТОРЫХ НУКЛИДОВ

Изотоп	Масса, а.е.м.	Изотоп	Масса, а.е.м.
${}^{1}_{1}H$	1,00783	${}^{10}_{5}B$	10,01299
${}^{2}_{1}H$	2,0140	${}^{11}_{5}B$	11,00930
${}^{3}_{1}H$	3,01605	${}^{13}_{6}C$	13,00335
${}^{3}_{2}He$	3,01603	${}^{16}_{8}O$	15,99451
${}^{4}_{2}He$	4,00260	${}^{99}_{38}Sr$	98,99320
${}^{6}_{3}Li$	6,01512	${}^{135}_{54}Xe$	134,90310
${}^{7}_{3}Li$	7,01693	${}^{137}_{56}Ba$	136,90581
${}^{8}_{4}Be$	8,00531	${}^{29}_{84}Po$	209,98292
${}^{9}_{4}Be$	9,01218	${}^{235}_{92}U$	235,11960

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ПЕРИОДЫ	A I B	A II B	A III B	A IV B	A V B
1					
2	Li 3 6,941 Lithium ЛИТИЙ	Be 4 9,01218 Berillium БЕРИЛЛИЙ	B 5 10,811 Borum БОР	C 6 12,011 Carboneum УГЛЕРОД	N 7 14,0067 Nitrogenium АЗОТ
3	Na 11 22,98977 Natrium НАТРИЙ	Mg 12 24,305 Magnesium МАГНИЙ	Al 13 26,98154 Aluminium АЛЮМИНИЙ	Si 14 28,0855 Silicium КРЕМНИЙ	P 15 30,97376 Phosphorum ФОСФОР
4	K 19 39,0983 Kalium КАЛИЙ	Ca 20 40,078 Calcium КАЛЬЦИЙ	21 44,95591 Sc Scandium СКАНДИЙ	22 47,88 Ti Titanium ТИТАН	23 50,9415 V Vanadium ВАНАДИЙ
	29 63,546 Cu Cuprum МЕДЬ	30 65,39 Zn Zincum ЦИНК	Ga 31 69,723 Gallium ГАЛЛИЙ	Ge 32 72,59 Germanium ГЕРМАНИЙ	As 33 74,9216 Arsenicum МЫШЬЯК
5	Rb 37 85,4678 Rubidium РУБИДИЙ	Sr 38 87,62 Strontium СТРОНЦИЙ	39 88,9059 Y Yttrium ИТТРИЙ	40 91,224 Zr Zirconium ЦИРКОНИЙ	41 92,9064 Nb Niobium НИОБИЙ
	47 107,8682 Ag Argentum СЕРЕБРО	48 112,41 Cd Cadmium КАДМИЙ	In 49 114,82 Indium ИНДИЙ	Sn 50 118,710 Stannum ОЛОВО	Sb 51 121,75 Stibium СУРЬМА
6	Cs 55 132,9054 Cesium ЦЕЗИЙ	Ba 56 137,33 Barium БАРИЙ	57 138,9055 La* Lantanum ЛАНТАН	72 178,49 Hf Hafnium ГАФНИЙ	73 180,9479 Ta Tantalum ТАНТАЛ
	79 196,9665 Au Aurum ЗОЛОТО	80 200,59 Hg Hydragyrum РТУТЬ	Tl 81 204,383 Thallium ТАЛЛИЙ	Pb 82 207,2 Plumbum СВИНЕЦ	Bi 83 208,9804 Bismuthum ВИСМУТ
7	Fr 87 [223] Francium ФРАНЦИЙ	Ra 88 [226] Radium РАДИЙ	89 [227] Ac** Actinium АКТИНИЙ	104 [261] Db Dubnium ДУБНИЙ	105 [262] Jl Joliotium ЖОЛИОТИЙ
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ	R_2O	RO	R_2O_3	RO_2	R_2O_5

*ЛАНТАНОИДЫ						
58 140,12 Ce Cerium ЦЕРИЙ	59 140,9077 Pr Praseodymium ПРАЗЕОДИМ	60 144,24 Nd Neodymium НЕОДИМ	61 [145] Pm Promethium ПРОМЕТИЙ	62 150,36 Sm Samarium САМАРИЙ	63 151,96 Eu Europium ЕВРОПИЙ	64 157,25 Gd Gadolinium ГАДОЛИНИЙ
**АКТИНОИДЫ						
90 232,0381 Th Thorium ТОРИЙ	91 [231] Pa Protactinium ПРОТАКТИНИЙ	92 238,0289 U Uranium УРАН	93 [237] Np Neptunium НЕПТУНИЙ	94 [244] Pu Plutonium ПЛУТОНИЙ	95 [243] Am Americium АМЕРИЦИЙ	96 [247] Cm Curium КЮРИЙ

ЭЛЕМЕНТОВ МЕНДЕЛЕЕВА

A VI B	A VII B	A VIII B		
	H 1 1,00794 Hydrogenium ВОДОРОД	**He** 2 4,002602 Helium ГЕЛИЙ	обозначение элемента; атомный номер; **Ca** 20 40,078 Calcium КАЛЬЦИЙ; атомная масса	
O 8 15,9994 Oxigenium КИСЛОРОД	**F** 9 18,998403 Florum ФТОР	**Ne** 10 20,179 Neon НЕОН		
S 16 32,066 Sulfur СЕРА	**Cl** 17 35,453 Chlorum ХЛОР	**Ar** 18 39,948 Argon АРГОН		
24 51,9961 **Cr** Chromium ХРОМ	25 44,9380 **Mn** Marganum МАРГАНЕЦ	26 55,847 **Fe** Ferrum ЖЕЛЕЗО	27 58,9332 **Co** Cobaltum КОБАЛЬТ	28 58,69 **Ni** Niccolum НИКЕЛЬ
Se 34 78,96 Selenium СЕЛЕН	**Br** 35 79,904 Bromum БРОМ	**Kr** 36 83,80 Krypton КРИПТОН	- s-элементы; - p-элементы	
42 95,94 **Mo** Molybdanium МОЛИБДЕН	43 [98] **Tc** Technetium ТЕХНЕЦИЙ	44 101,07 **Ru** Ruthenium РУТЕНИЙ	45 102,9055 **Rh** Rhodium РОДИЙ	46 106,42 **Pd** Palladium ПАЛЛАДИЙ
Te 52 127,60 Tellurium ТЕЛЛУР	**I** 53 126,9045 Iodium ЙОД	**Xe** 54 131,29 Xenon КСЕНОН	- d-элементы; - f-элементы	
74 183,85 **W** Wolfremium ВОЛЬФРАМ	75 186,207 **Re** Renium РЕНИЙ	76 190,2 **Os** Osmium ОСМИЙ	77 192,22 **Ir** Iridium ИРИДИЙ	78 195,08 **Pt** Platinum ПЛАТИНА
Po 84 [209] Polonium ПОЛОНИЙ	**At** 85 [210] Astatium АСТАТ	**Rn** 86 [222] Radon РАДОН		
106 [263] **Rf** Rutherfordium РЕЗЕРФОРДИЙ	107 [264] **Bh** Borium БОРИЙ	108 [265] **Hn** Hahnium ГАНИЙ	109 [266] **Mt** Meitnerium МЕЙТНЕРИЙ	110 [ ]
RO_3	R_2O_7	RO_4		

65 158,9254 **Tb** Terbium ТЕРБИЙ	66 162,5 **Dy** Dysposium ДИСПРОЗИЙ	67 164,9304 **Ho** Holmium ГОЛЬМИЙ	68 167,26 **Er** Erbium ЭРБИЙ	69 168,9342 **Tm** Thulium ТУЛИЙ	70 173,04 **Yb** Ytterbium ИТТЕРБИЙ	71 174,967 **Lu** Lutetium ЛЮТЕЦИЙ
97 [247] **Bk** Berklium БЕРКЛИЙ	98 [251] **Cf** Californium КАЛИФОРНИЙ	99 [252] **Es** Einshtenium ЭЙНШТЕНИЙ	100 [257] **Fm** Fermium ФЕРМИЙ	101 [258] **Md** Mendelevium МЕНДЕЛЕВИЙ	102 259,1009 **No** Nobelium НОБЕЛИЙ	103 260,1054 **Lr** Lawrencium ЛОУРЕНСИЙ

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – Москва : Наука, 2007. – 384 с.

2. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – Москва : Высшая школа, 2007. – 436 с.

3. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике / И.Е. Иродов. – Москва : Наука, 2001. – 432 с.

4. Кужир, П.Г. Общая физика. Электричество и магнетизм. Сборник задач / П.Г. Кужир, Н.П. Юркевич, Г.К. Савчук. – Минск : Изд-во Гревцова, 2013. – 209 с.

5. Лансберг, Г.С. Оптика / Г.С. Лансберг. – Москва : Наука, 1976. – 928 с.

6. Матвеев, А.Н. Атомная физика / А.Н. Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1989. – 439 с.

7. Матвеев, А.Н. Оптика / А.Н. Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1985. – 351 с.

8. Савельев, И.В. Курс общей физики в 3 т. / И.В. Савельев. – Москва : Лань, 2018. – 308 с.

9. Сборник задач по общему курсу физики : в 2 ч. – Механика. Статистическая физика и термодинамика / П.Г. Кужир, Н.П. Юркевич и Г.К. Савчук. – 3-е изд. – Минск : БНТУ, 2014. – Ч. 1. – 219 с.

10. Сивухин, Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – Москва : Физматлит, 2005. – Т. 4. – 792 с.

11. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики для ВТУЗов / Т.И. Трофимова. – Москва : Мир и образование, 2003. – 384 с.

12. Чертов, А.Г. Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – Москва : Физматлит, 2001. – 640 с.

13. Шаскольская, М.П. Сборник избранных задач по физике / М.П. Шаскольская, И.Д. Эльцин. – Москва : Наука, 1986. – 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

КУЖИР Павел Григорьевич
ЮРКЕВИЧ Наталья Петровна
САВЧУК Галина Казимировна

ОБЩАЯ ФИЗИКА: оптика, квантовая физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. Сборник задач

Учебное пособие

Редактор *Т.В. Мейкшане*
Компьютерная верстка *Е.А. Беспанской*

Подписано в печать 10.05.2018. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 11,51. Уч.-изд. л. 9,00. Тираж 120. Заказ 198.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.