

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.А. ПОГОЖИХ, С.А. СТРЕЛЬЦОВ

ФИЗИКА
СБОРНИК ЗАДАЧ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, КОЛЕБАНИЯ
И ВОЛНЫ, ОПТИКА, КВАНТОВАЯ
И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2020

УДК 53(076.1)
П 434

Рецензенты:

доцент кафедры общей и теоретической физики НГПУ,
канд. техн. наук *В.Г. Приданов*
профессор кафедры общей физики НГТУ
д-р физ.-мат. наук *А.А. Штыгашев*

Учебное пособие подготовлено на кафедре общей физики НГТУ
в соответствии с рабочей программой и предназначено
для студентов I–II курсов всех специальностей очной формы обучения
факультета летательных аппаратов НГТУ

Погожих С.А.

П 434 Физика. Сборник задач. Электромагнетизм, колебания и волны, оптика, квантовая и ядерная физика: учебное пособие / С.А. Погожих, С.А. Стрельцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 120 с.

ISBN 978-5-7782-4163-3

Пособие содержит основные типы задач, рассматриваемых на практических занятиях по физике, и предназначено для студентов всех специальностей факультета летательных аппаратов. Сборник задач состоит из введения и основной части, разбитой на пять разделов: электромагнетизм, колебания и волны, оптика, квантовая физика, ядерная физика и элементарные частицы, а также справочных сведений, указаний и ответов. Для каждой темы приведены основные определения и формулы, примеры решения задач, справочные данные.

УДК 53(076.1)

ISBN 978-5-7782-4163-3

© Погожих С.А., Стрельцов С.А., 2020
© Новосибирский государственный
технический университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
1. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....	5
Занятие 1. Закон Био–Савара–Лапласа.....	17
Занятие 2. Сила Ампера. Сила Лоренца.....	19
Занятие 3. Циркуляция магнитной индукции. Магнетики	21
Занятие 4. Электромагнитная индукция. Индуктивность.....	23
Занятие 5. Энергия магнитного поля.....	25
2. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	27
Занятие 6. Колебательные процессы. Характеристики колебаний. Колебательный контур.....	35
Занятие 7. Затухающие колебания. Резонанс	36
Занятие 8. Вынужденные электрические колебания. Переменный ток. Резонанс токов, резонанс напряжений	38
Занятие 9. Волновые процессы. Звук	40
Занятие 10. Электромагнитные волны	41
Занятие 11. Коллоквиум	43
3. ОПТИКА.....	44
Занятие 12. Интерференция света.....	55
Занятие 13. Дифракция света	57
Занятие 14. Поляризация света	58
4. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА.....	61
Занятие 15. Тепловое излучение	82
Занятие 16. Квантовые свойства излучения.....	84
Занятие 17. Волны де Бройля. Соотношения неопределенностей.....	86
Занятие 18. Простейшие задачи квантовой механики	87
Занятие 19. Водородоподобные атомы. Квантовые числа атомов.....	90
Занятие 20. Электропроводность металлов и полупроводников	91
5. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ.....	93
Занятие 21. Ядро. Радиоактивность.....	105
Занятие 22. Ядерные реакции. Элементарные частицы.....	106
Приложение. справочные сведения.....	108
Библиографический список.....	117
Ответы.....	118

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник задач предназначен для студентов всех специальностей ФЛА НГТУ дневной формы обучения. В нём авторы собрали задачи, используемые ими в процессе преподавания курса физики в течение ряда лет. Содержание сборника соответствует актуальным рабочим программам, принятым на кафедре общей физики НГТУ. Задачи подобраны таким образом, чтобы как можно более полно охватить содержание изучаемых разделов физики, и рассчитаны на использование на аудиторных практических занятиях и на самостоятельное решение. Отбор задач произведен на основе многолетнего опыта преподавания авторов и включает задачи, как разработанные авторами, так и содержащиеся в известных сборниках [1–5].

Сборник задач состоит из предисловия и основной части, разбитой на пять разделов: электромагнетизм, колебания и волны, оптика, квантовая физика, ядерная физика и элементарные частицы, а также справочных данных, указаний и ответов. Для каждой темы приведены основные определения и формулы, примеры решения задач.

Все представленные задачи помимо того, что разбиты по темам, делятся на две группы – для аудиторной работы и для самостоятельного решения (имеют номер вида **ДХ.Х**). Рисунки даны в тексте задачи. Задачи для самостоятельного решения в большинстве своём аналогичны задачам, решаемым в аудитории, что должно способствовать закреплению пройденного материала. Как правило, общее количество аудиторных задач превышает возможности практического занятия, поэтому выбор конкретных задач для данного занятия допускает варианты. В конце пособия приведены численные ответы на задачи. Причём если ответ получается простой подстановкой в формулу исходных величин (задача на отработку понятий), то такие ответы, хоть и являются численными, не приведены. Если в задаче необходимо найти несколько величин, в ответах они приведены в том же порядке, что и в условиях.

1. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Основные формулы

Вектор магнитной индукции \vec{B} связан с вектором напряженности магнитного поля \vec{H} (для однородной и изотропной среды) соотношением

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

где μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), μ – магнитная проницаемость среды.

Магнитная индукция поля точечного заряда q , движущегося с нерелятивистской скоростью \vec{v} в данной точке

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu q [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от заряда q к точке наблюдения, направление \vec{B} определяют по **правилу правого винта**.

Закон Био–Савара–Лапласа для проводника с током I , элемент dl которого создает в некоторой точке поля индукцию $d\vec{B}$

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

где $d\vec{l}$ – вектор, равный по модулю длине dl элемента проводника и совпадающий по направлению с направлением тока в проводнике; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента dl проводника в точку наблюдения. Направление вектора $d\vec{B}$ перпендикулярно $d\vec{l}$ и \vec{r} , т. е.

перпендикулярно плоскости, в которой они лежат. Это направление определяют по **правилу правого винта**. Модуль вектора $d\vec{B}$ определяется по формуле

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

где α – угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} , $|\vec{r}| = r$.

Принцип суперпозиции: вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля, создаваемого несколькими движущимися зарядами или токами, равен векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым движущимся зарядом или током в отдельности

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

Магнитное поле (индукция) прямого тока, т. е. тока, текущего по тонкому прямому проводу бесконечной длины

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi a},$$

где I – сила тока, текущего по тонкому прямому проводу; a – кратчайшее расстояние от проводника до точки наблюдения. Пример конфигурации тока и магнитного поля дан на рис. 1.1. В случае конечной длины провода с током индукция будет определяться формулой

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi a} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 – углы, под которыми видна точка, где определяют индукцию B , из концов провода.

Магнитное поле на оси кругового тока

$$B = \frac{\mu_0 \mu R^2 I}{2(a^2 + R^2)^{3/2}},$$

где a – расстояние от центра кругового тока до точки наблюдения; R – радиус витка с током.

В центре витка с током ($a = 0$) $B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}$, а на расстоянии $a \gg R$

$$B = \frac{\mu_0 \mu R^2 I}{2a^3}.$$

Сила Лоренца – результирующая сила, приложенная к заряду q , если на него помимо магнитного поля с индукцией \vec{B} действует электрическое поле с напряженностью \vec{E} :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}; \vec{B}],$$

где v – скорость заряда q .

Сила Ампера – сила, с которой магнитное поле действует на элемент проводника dl с током I , находящегося в магнитном поле с индукцией \vec{B}

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}; \vec{B}].$$

Сила взаимодействия двух параллельных проводников с токами I_1 и I_2 , рассчитанная на единицу длины

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi b},$$

где b – расстояние между проводниками.

Поток вектора магнитной индукции \vec{B} сквозь площадку dS

$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = \vec{B}\vec{n}dS,$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к плоскости площадки, как на рис. 1.4.

Теорема Гаусса: поток вектора \vec{B} сквозь любую замкнутую поверхность S равен нулю

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0.$$

Равенство нулю этого интеграла свидетельствует об отсутствии источников магнитного поля – «зарядов», аналогичных электрическим.

Теорема о циркуляции вектора \vec{B} (для магнитного поля постоянных токов в вакууме): циркуляция вектора \vec{B} по произвольному замкнутому контуру L равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых контуром L . Эта циркуляция не равна нулю, так как магнитное поле не потенциально:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i.$$

При этом знак тока связан с направлением обхода контура правилом правого винта.

Магнитное поле длинного соленоида (в вакууме)

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 nI,$$

где N – число витков соленоида; l – длина соленоида; I – сила тока соленоида; n – число витков на единицу длины соленоида. Длинным считается соленоид, длина которого много больше его поперечного размера.

Магнитное поле тороида (пример приведен на рис. 1.2)

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r},$$

где N – число витков тороида-катушки; r – радиус контура.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = Id\Phi,$$

где I – сила тока в проводнике; $d\Phi$ – изменение потока вектора магнитной индукции, пронизывающего площадь, пересекаемую проводником при его перемещении в магнитном поле.

Момент сил, действующих на контур с током

$$\vec{M} = [\vec{p}_m; \vec{B}],$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции; \vec{p}_m – вектор магнитного момента контура с током, для плоского контура с током I вектор магнитного

момента $\vec{p}_m = IS\vec{n}$, S – площадь поверхности контура, \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности контура.

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея) – какова бы ни была причина изменения магнитного потока Φ , охватываемого замкнутым проводящим контуром, возникающая в контуре ЭДС индукции, определяется следующим образом:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Правило Ленца: индукционный ток в замкнутом контуре всегда направлен так, чтобы создаваемый им магнитный поток компенсировал изменение внешнего магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Индуктивность соленоида

$$L = \mu_0\mu \frac{N^2 S}{l} = \mu_0\mu n^2 l S = \mu_0\mu n^2 V,$$

где N – число витков соленоида; S – площадь его поперечного сечения; l – длина соленоида; μ – магнитная проницаемость сердечника соленоида; n – число витков на единицу его длины; V – его объем.

ЭДС самоиндукции ε_s , возникающая в контуре при изменении проходящего через него тока

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} \quad (L = \text{const}),$$

где L – индуктивность контура; I – сила тока в контуре.

Магнитная энергия контура с током

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

где L – индуктивность контура; I – сила тока в контуре.

Объемная плотность энергии магнитного поля

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

Магнитное поле в веществе

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}',$$

где \vec{B}_0 – магнитная индукция поля, созданного токами проводимости (внешнего магнитного поля); \vec{B}' – магнитная индукция магнитного поля, созданного намагниченной средой (поле молекулярных токов).

Намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V},$$

где ΔV – физически бесконечно малый объем в окрестности данной точки; \vec{p}_m – магнитный момент отдельной молекулы. Суммирование проводится по всем молекулам в объеме ΔV .

Циркуляция намагниченности

$$\oint_L \vec{J} d\vec{l} = I',$$

где I' – алгебраическая сумма токов намагничивания (молекулярных токов), охватываемых контуром L .

Вектор электрической индукции поля \vec{H} и его циркуляция

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}, \quad \oint_L \vec{H} d\vec{l} = I,$$

где I – алгебраическая сумма токов проводимости, охватываемых контуром L .

Для магнетиков, у которых $\vec{J} = \chi \vec{H}$, где χ – магнитная восприимчивость,

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad \mu = 1 + \chi,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды.

Для ферромагнетиков зависимость $J(H)$, а следовательно, и $B(H)$ имеют сложный характер – они не линейны и, помимо того, наблюдается гистерезис. Например, для технически чистого железа зависимость $B(H)$ показана на рис. 1.3.

Примеры решения задач

Пример 1.1. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого отрезком прямого провода длиной 10 см на перпендикулярной ему оси симметрии (расстояние $a = 5$ см). Сила тока в проводе -1 А.

Решение

Каждый элемент провода dl создает в точке O магнитную индукцию $d\vec{B}$, пропорциональную векторному произведению $[\vec{dl}; \vec{r}]$, т. е. направленную за плоскость чертежа в соответствии с правилом правого винта (рис. 1.1).

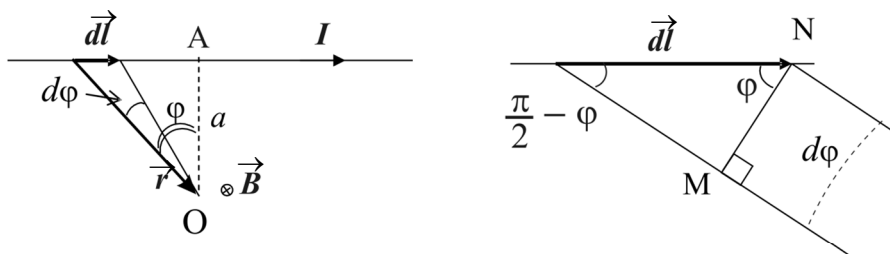


Рис. 1.1

Таким образом, величины dB в точке O , создаваемые током каждого элемента прямого провода, можно складывать алгебраически. Чтобы найти индукцию от всего провода, нужно проинтегрировать модуль $d\vec{B}$ по длине отрезка. Согласно закону Био–Савара–Лапласа

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dl \sin(\pi/2 - \varphi)}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dl \cos \varphi}{r^2}.$$

Однако гораздо удобнее интегрировать не по длине отрезка (в этом случае интегрирование сложное), а по углу φ между нормалью к отрезку и направлением на его выбранную точку. Если $d\varphi$ – бесконечно малое приращение φ , то $|MN| = r d\varphi$ и

$$dl = \frac{|MN|}{\cos \varphi} = \frac{r d\varphi}{\cos \varphi}.$$

Подставив в выражение для dB последнюю формулу и учитывая, что $r = \frac{a}{\cos \varphi}$, получим

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cos \varphi d\varphi}{a}.$$

Теперь эта функция легко интегрируется по углу φ в пределах от $-\varphi_0$ до $+\varphi_0$ (исходя из симметрии системы, удобно принять за направление $\varphi = 0$ направление перпендикуляра OA , так что $\operatorname{tg} \varphi_0 = L/2a$).

$$B = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{a} \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \cos \varphi d\varphi = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{a} (\sin \varphi_0 + \sin \varphi_0) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \sin \varphi_0}{a}.$$

Поскольку

$$\sin \varphi_0 = \frac{L}{2\sqrt{a^2 + \frac{L^2}{4}}},$$

окончательно получаем

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{a} \frac{L}{\sqrt{a^2 + \frac{L^2}{4}}} \approx 2,8 \text{ мкТл}.$$

Пример 1.2. Тороидальный соленоид с немагнитным сердечником из технически чистого железа, длина которого вдоль средней линии равна 1 м, имеет зазор в сердечнике размером 5 мм (рис. 1.2). По обмотке соленоида, содержащей 2000 витков, пустили ток силой 1 А. Определить индукцию магнитного поля в зазоре.

Решение

Воспользуемся законом полного тока для контура C , проходящего по средней линии тороидального сердечника (рис. 1.2). Он охватывает N одинаковых токов I , поэтому

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = NI.$$

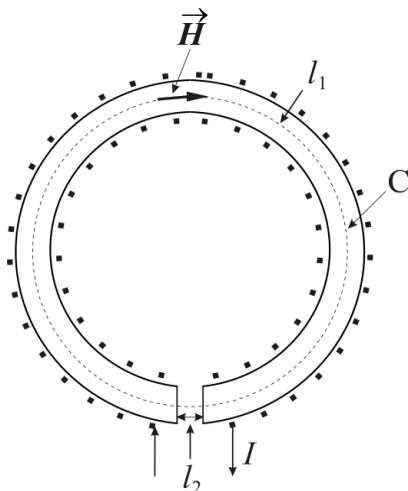


Рис. 1.2

Симметрия геометрии задачи и малость размера зазора l_2 позволяют считать величину H постоянной на участках контура C внутри и вне сердечника (H_1 и H_2 соответственно), кроме того, направление вектора напряженности везде совпадает с вектором dl , так что

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = NI.$$

На границах зазора $\mu H = \text{const}$ (нормальная составляющая магнитной индукции $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$ не испытывает скачка), т. е. $\mu H_1 = H_2$ (считаем для воздуха $\mu = 1$). Таким образом,

$$H_1 l_1 + \frac{B}{\mu_0} l_2 = NI,$$

где величина B одна и та же в сердечнике и в зазоре.

Зависимость $B = f(H_1)$ для железа описывается эмпирической кривой (рис. 1.3), поэтому последнее уравнение удобно записать в виде

$$B = f(H_1) = -\mu_0 \frac{l_1}{l_2} H_1 + \mu_0 \frac{NI}{l_2}.$$

Правая часть этого выражения есть линейная функция от H_1 . Выразив коэффициенты в единицах СИ, получим

$$B = f(H_1) = -26 \cdot 10^{-5} H_1 + 0,50.$$

Решение данного уравнения можно получить, построив кривую $B = f(H_1)$ и прямую $B = -26 \cdot 10^{-5} H_1 + 0,50$ на одной координатной плоскости.

Для построения прямой можно взять, например, значения $H_1 = 0$ и $H_2 = 1000$ А/м, соответствующие значения $B = f(H_1)$ будут равны 0,50 и 0,24 Тл. На рис. 1.3 это прямая P_1P_2 , пересекающая кривую намагничивания на ее вертикальном участке, где $H_1 \approx 50$ А/м. Отсюда магнитная индукция в зазоре равна

$$B = -50 \cdot 26 \cdot 10^{-5} + 0,50 \approx 0,49 \text{ Тл.}$$

В данном режиме магнитная проницаемость сердечника составляет

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \approx 7800.$$

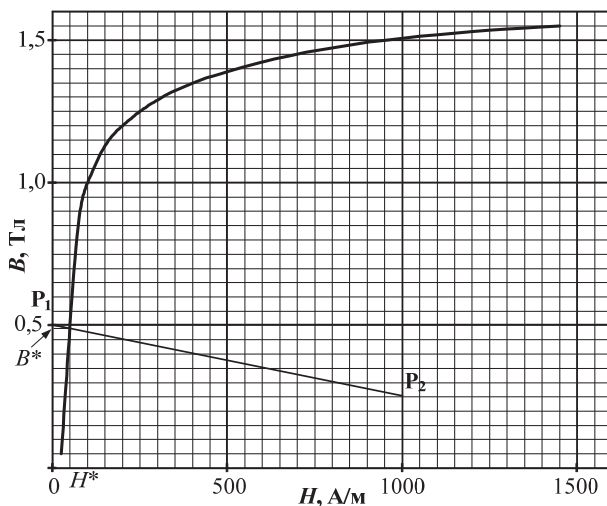


Рис. 1.3

Пример 1.3. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 400$ В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B = 2 \cdot 10^{-3}$ Тл. Вектор скорости электрона перпендикулярен вектору \vec{B} . Определить радиус кривизны R траектории и период T вращения электрона в магнитном поле. Заряд электрона $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $-9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Решение

На движущийся в магнитном поле электрон действует сила Лоренца, модуль которой равен $\vec{F}_Л = e[\vec{v}; \vec{B}]$. Она перпендикулярна скорости, поэтому работы не производит, так что модуль скорости постоянен и $F_Л = \text{const}$. С другой стороны, согласно второму закону Ньютона, $m\vec{a} = \vec{F}_Л$, т. е. ускорение в любой момент также перпендикулярно скорости (нормальное) и постоянно по модулю, что означает равномерное движение по окружности

$$a = a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{evB}{m}.$$

Отсюда радиус окружности

$$R = \frac{mv}{eB}.$$

Электрон, пройдя разность потенциалов U , приобрел кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2} = eU$, отсюда $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$.

Таким образом, радиус окружности

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}} = 34 \text{ мм}.$$

Период вращения – время, за которое электрон делает один оборот, т. е. проходит путь, равный длине окружности $T = 2\pi R/v$. Подставив выражения для скорости и радиуса, получим

$$T = \frac{2\pi}{B\sqrt{\frac{2eU}{m}}} \sqrt{\frac{2mU}{e}} = \frac{2\pi m}{eB} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

Отметим, что период вращения не зависит от скорости электрона.

Пример 1.4. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл равномерно с частотой $\nu = 10 \text{ с}^{-1}$ вращается плоская рамка, состоящая из $N = 100$ витков тонкого провода, плотно прилегающих друг к другу. Плоскость вращения вектора нормали \vec{n} к плоскости рамки параллельна направлению вектора B . Площадь рамки $S = 150 \text{ см}^2$. Определить мгновенное значение ЭДС индукции ε_i , соответствующее углу между векторами \vec{n} и B $\varphi_0 = 30^\circ$, и среднее значение ЭДС $\langle \varepsilon_i \rangle$, индуцируемой в рамке при изменении угла φ от $\varphi_1 = 0^\circ$ до $\varphi_2 = 90^\circ$.

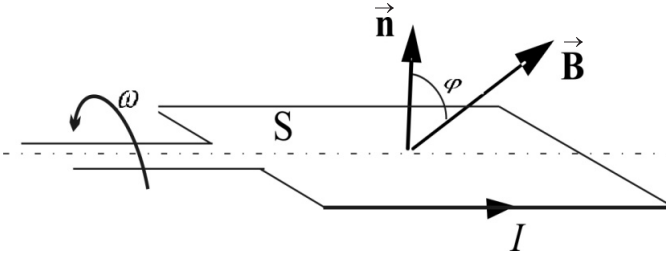


Рис. 1.4

Решение

По определению магнитный поток, пронизывающий плоскость одного витка рамки (рис. 1.4), $\Phi = BS \cos \varphi$. При равномерном вращении $\varphi = \omega t$ (если выбрать момент $t = 0$ при $\varphi = 0$), соответственно $\Phi(t) = BS \cos(\omega t)$. Мгновенное значение ЭДС индукции ε_i определяется по закону Фарадея. Учитывая, что число витков равно N и ЭДС, наводимые в каждом витке, действуют в одном направлении, получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -NBS \frac{d \cos(\omega t)}{dt} = NBS \omega \sin(\omega t) = \\ &= 2\pi \nu NBS \omega \sin(2\pi \nu t). \end{aligned}$$

При $\varphi_0 = 30^\circ$ получим $\varepsilon_i = 2\pi v NBS \sin(\varphi_0) = 4,7 \text{ В}$.

Среднее значение $\langle \varepsilon_i \rangle$, индуцируемой в течение некоторого промежутка времени Δt , равно $\langle \varepsilon_i \rangle = -N \cdot \Delta\Phi / \Delta t$. При заданном повороте от $\varphi_1 = 0^\circ$ до $\varphi_2 = 90^\circ$ $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = NBS(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1)$, интервал времени составляет четверть периода, т. е. $\Delta t = 1/(4v)$. Таким образом,

$$\langle \varepsilon_i \rangle = 4vNBS(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1) = 6 \text{ В}.$$

Занятие 1. Закон Био–Савара–Лапласа

1.1. На рис. 1.5 показана прямоугольная рамка (контур) с током в однородном магнитном поле. Укажите направление: а) векторов сил Ампера, действующих на все стороны рамки; б) вектора вращающего момента рамки относительно оси OO .

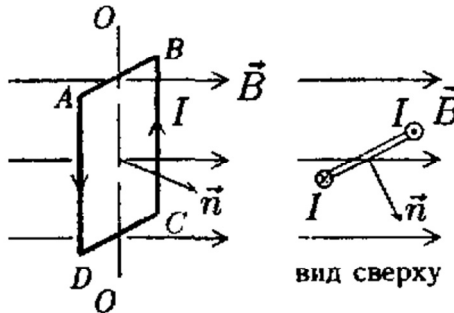


Рис. 1.5

1.2. Какой вращающий момент испытывает рамка с силой тока 10 А при помещении ее в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$, если рамка содержит $N = 50$ витков площадью $S = 20 \text{ см}^2$, а ее нормаль образует с вектором индукции магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$?

1.3. Определить магнитную индукцию поля в точке, находящейся на продолжении одной из сторон прямого угла, образованного бесконечно длинным проводником, по которому течет ток 15 А, на расстоянии 10 см от вершины угла.

1.4. Прямой бесконечный проводник имеет круговую петлю (рис. 1.6) радиусом 80 см. Определить силу тока в проводнике, если известно, что в точке A магнитная индукция равна 12,5 мкТл.

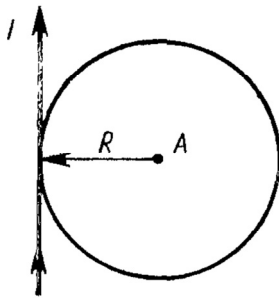


Рис. 1.6

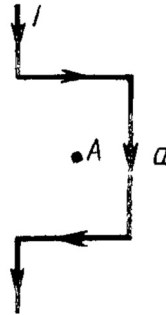


Рис. 1.7

1.5. Найти силу тока в бесконечно длинном проводнике, который имеет квадратный изгиб (рис. 1.7) со стороной квадрата $a = 40$ см, если модуль магнитной индукции поля в точке A , расположенной в центре квадрата, $B = 63$ мкТл.

1.6. По двум параллельным бесконечно длинным проводникам, находящимся на расстоянии 10 см друг от друга, текут токи противоположного направления 30 А. Определить магнитную индукцию поля в точке, расположенной посередине между проводниками. Чему равна магнитная индукция поля в точке, которая находится на расстоянии 10 см от обоих проводников?

1.7. Определить силу тока в катушке радиусом 30 см, содержащей 600 витков, если в центре катушки магнитная индукция равна 7,5 мТл. Считать, что длина катушки значительно меньше ее радиуса. Определить магнитный момент катушки.

1.8. Определить силу тока в катушке длиной 10 см, содержащей 600 витков, если в центре катушки магнитная индукция равна 7,5 мТл. Считать, что длина катушки значительно больше ее радиуса.

1.9. Определить силу тока в вертикально расположенной катушке, которая содержит 8 витков проволоки радиусом 20 см, если помещенная в ее центре на острие магнитная стрелка отклонилась на угол $\alpha = 45^\circ$. Плоскость витков катушки совпадает с плоскостью магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая магнитной индукции поля Земли $B_0 = 20$ мкТл.

1.10. Определить максимальную магнитную индукцию B_{\max} поля, создаваемого электроном, движущимся прямолинейно со скоростью $v = 10$ Мм/с, в точке, отстоящей от траектории на расстоянии $d = 1$ нм.

Задачи для самостоятельного решения

Д1.1. Найти магнитную индукцию в центре тонкого кольца, по которому идет ток $I = 10$ А. Радиус кольца равен 5 см.

Д1.2. При какой силе тока, текущего по тонкому проводящему кольцу радиусом 0,2 м, магнитная индукция в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние 0,3 м, станет равной 20 мкТл?

Д1.3. По двум бесконечно длинным прямым проводам, скрещенным под прямым углом, текут токи $I_1 = 30$ А и $I_2 = 40$ А. Расстояние d между проводами равно 20 см. Определить магнитную индукцию B в точке C (рис. 1.8), одинаково удаленной от обоих проводов на расстояние d .

Д1.4. Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводнику течет ток 20 А. Какова магнитная индукция B в точке A (рис. 1.9), если $r = 5$ см?

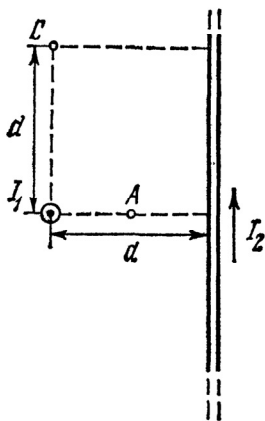


Рис. 1.8

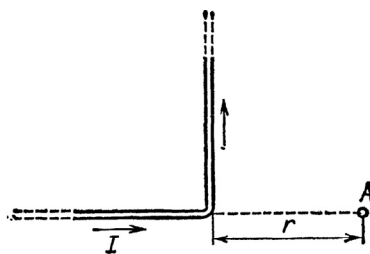


Рис. 1.9

Занятие 2. Сила Ампера. Сила Лоренца

2.1. На двух параллельных шинах, расположенных горизонтально на расстоянии 10 см, лежит толстый проводник массой 100 г. Шины подключены к источнику напряжения, и в проводнике возникает сила тока 10 А. При создании магнитного поля, вектор индукции которого

перпендикулярен плоскости шин, проводник приходит в равномерное движение. Определить индукцию поля, если коэффициент трения проводника о шины 0,2.

2.2. В поле бесконечно длинного прямолинейного проводника, в котором сила тока $I_1 = 20$ А, находится квадратная рамка со стороной $a = 10$ см, в которой сила тока $I_2 = 1$ А. Проводник и рамка расположены в одной плоскости так, что две стороны рамки перпендикулярны проводнику. Расстояние от проводника до ближайшей стороны рамки $L = 5$ см. Определить силу, действующую на рамку.

2.3. В двух параллельных проводниках двухпроводной линии длиной 5 м силы тока равны 500 А. Направление токов противоположное. С какой силой взаимодействуют провода, если расстояние между ними 25 см?

2.4. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U = 500$ В, попал в вакууме в однородное магнитное поле и движется по окружности радиусом $R = 10$ см. Определить модуль магнитной индукции, если скорость электрона перпендикулярна силовым линиям.

2.5. Электрон, движущийся в вакууме со скоростью 10^6 м/с, попадает в однородное магнитное поле с индукцией 1,2 мТл под углом 30° к силовым линиям поля. Определить радиус винтовой линии, по которой будет двигаться электрон, и ее шаг.

2.6. Определить наименьшее значение радиуса дуанта циклотрона, предназначенного для ускорения протонов до энергии 0,8 пДж, в котором индукция магнитного поля 0,5 Тл. Зависимость массы протона от его скорости не учитывать.

2.7. Найти скорость α -частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, не испытывает никакого отклонения. Магнитная индукция поля $B = 6$ мТл, напряженность электрического поля $E = 6$ кВ/м. Направление скорости α -частицы перпендикулярно \vec{B} и \vec{E} .

Задачи для самостоятельного решения

Д2.1. Прямой провод, по которому течет ток $I = 1$ кА, расположен в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции. С какой силой F действует поле на отрезок провода длиной $l = 1$ м, если магнитная индукция B равна 1 Тл?

Д2.2. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи 1 кА . Определить силу, действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном ее длине.

Д2.3. Двухпроводная линия состоит из длинных параллельных прямых проводов, находящихся на расстоянии 4 мм друг от друга. По проводам текут одинаковые токи 50 А . Определить силу взаимодействия токов, приходящуюся на единицу длины провода.

Д2.4. Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией $0,015 \text{ Тл}$ по окружности радиусом 10 см . Определить импульс иона.

Д2.5. Протон с кинетической энергией 1 МэВ влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции ($B = 1 \text{ Тл}$). Какова должна быть минимальная протяженность l поля в направлении, по которому летел протон, когда он находился вне поля, чтобы оно изменило направление движения протона на противоположное?

Занятие 3. Циркуляция магнитной индукции. Магнетики

3.1. Определить циркуляцию вектора магнитной индукции B по контуру L для конфигурации токов, приведенных на рис. 1.10. $I_1 = I = 10 \text{ А}$, $I_2 = 8 \text{ А}$.

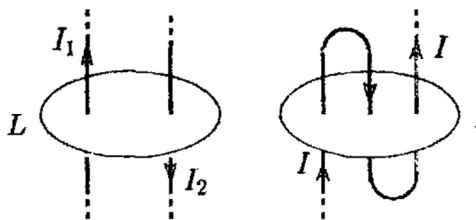


Рис. 1.10

3.2. На каркас длиной 10 см и диаметром 5 см намотано 150 витков провода. Через середину каркаса в направлении одного из его диаметров проходит медный проводник с силой тока 5 А . Считая магнитное

поле внутри средней части соленоида однородным, определить силу, с которой оно действует на участок проводника внутри каркаса, если сила тока в соленоиде 1 А.

3.3. Тонкая медная лента толщиной 0,1 мм помещена в однородное магнитное поле с индукцией 0,9 Тл так, что плоскость ленты перпендикулярна силовым линиям поля. В ленте сила тока 10 А. Определить разность потенциалов, возникающую вдоль ширины ленты, считая, что в меди имеется по одному свободному электрону на каждый атом.

3.4. Тонкая тороидальная катушка со стальным сердечником радиусом 5 см и зазором 3 мм имеет 1000 витков. Найти индукцию магнитного поля в зазоре, если ток в катушке 2 А. Найти магнитную проницаемость стали при этих условиях. Воспользоваться графиком зависимости индукции от напряженности магнитного поля для стали, представленном на рис. 1.11.

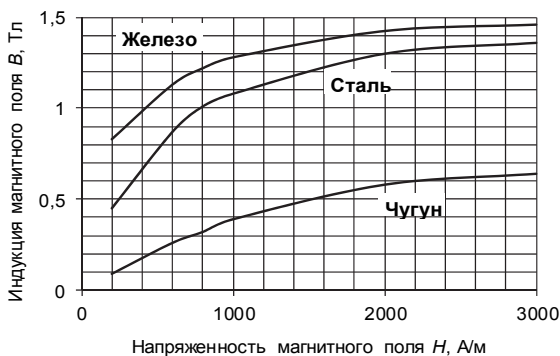


Рис. 1.11

3.5. В железном сердечнике соленоида индукция $B = 1,3$ Тл. Железный сердечник заменили стальным. Во сколько раз следует изменить силу тока в обмотке соленоида, чтобы индукция в сердечнике осталась неизменной?

3.6. На длинный чугунный сердечник сечением 4 см^2 намотан соленоид, содержащий 1000 витков, по которым проходит ток 0,5 А. Определить индуктивность соленоида при этих условиях, если напряженность магнитного поля внутри соленоида $H = 2 \text{ кА/м}$. Воспользоваться графиком $B = f(H)$.

Задачи для самостоятельного решения

ДЗ.1. По сечению проводника равномерно распределен ток плотностью $j = 2 \text{ МА/м}^2$. Найти циркуляцию вектора напряженности вдоль окружности радиусом $R = 5 \text{ мм}$, проходящей внутри проводника и ориентированной так, что ее плоскость составляет угол $\alpha = 30^\circ$ с вектором плотности тока.

ДЗ.2. Диаметр D тороида без сердечника по средней линии равен 30 см. В сечении тороид имеет круг радиусом $r = 5 \text{ см}$. По обмотке тороида, содержащей $N = 2000$ витков, течет ток $I = 5 \text{ А}$. Пользуясь законом полного тока, определить максимальное и минимальное значения магнитной индукции B в тороиде.

ДЗ.3. Железный сердечник находится в однородном магнитном поле напряженностью $H = 1 \text{ кА/м}$. Определить индукцию B магнитного поля в сердечнике и магнитную проницаемость μ железа. Воспользоваться графиком $B = f(H)$.

ДЗ.4. Соленоид намотан на чугунное кольцо сечением $S = 5 \text{ см}^2$. При силе тока $I = 1 \text{ А}$ магнитный поток $\Phi = 250 \text{ мкВб}$. Определить число n витков соленоида, приходящихся на отрезок длиной 1 см средней линии кольца.

Занятие 4. Электромагнитная индукция. Индуктивность

4.1. По первичной обмотке трансформатора течет переменный ток. График зависимости ЭДС индукции, наводимой во вторичной обмотке, от времени показан на рис. 1.12. Изобразить график зависимости тока, протекающего по первичной обмотке, от времени.

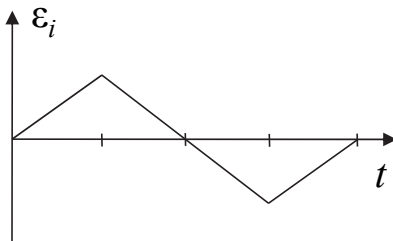


Рис. 1.12

4.2. Определить разность потенциалов, которая возникает на концах вертикальной автомобильной антенны длиной 1,2 м при движении автомобиля с востока на запад в магнитном поле Земли со скоростью 20 м/с. Горизонтальная составляющая земного магнитного поля $B_0 = 20$ мкТл.

4.3. Замкнутая накоротко катушка диаметром 10 см, имеющая 200 витков, находится в магнитном поле, индукция которого увеличивается от 2 до 6 Тл в течение 0,1 с. Определить среднее значение ЭДС индукции в катушке, если плоскость витков перпендикулярна линиям магнитной индукции.

4.4. Определить направление индукционного тока в металлическом кольце (рис. 1.13), если к нему приближать или удалять постоянный магнит. Ответ пояснить.

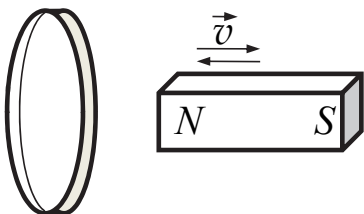


Рис. 1.13

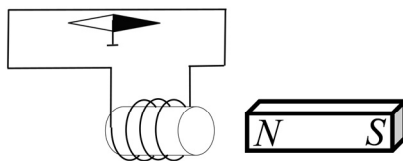


Рис. 1.14

4.5. Магнитная стрелка находится на игольчатом подшипнике под прямым проводом, соединенным с катушкой, намотанной на немагнитном каркасе. Как нужно перемещать магнит, чтобы повернуть стрелку южным полюсом к наблюдателю (рис. 1.14)? Ответ обосновать. Магнитная стрелка удалена далеко от магнита и соленоида.

4.6. В длинной катушке радиусом 2 см, содержащей 500 витков, сила тока 5 А. Определить индуктивность катушки, если индукция магнитного поля внутри катушки 12,5 мТл. Определить длину катушки и плотность намотки.

4.7. Рамка, содержащая 10 витков площадью $S = 5$ см², присоединена к баллистическому гальванометру с внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}} = 58$ Ом и помещена между полюсами электромагнита так, что линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости рамки. Определить индукцию поля, создаваемого электромагнитом, если при повороте рамки на 180° в цепи гальванометра протекает заряд $q = 30$ мкКл. Сопротивление рамки $R = 2$ Ом.

Задачи для самостоятельного решения

Д4.1. Магнитный поток $\Phi = 40$ мВб пронизывает замкнутый контур. Определить среднее значение ЭДС индукции, возникающей в контуре, если магнитный поток изменится до нуля за время $\Delta t = 2$ мс.

Д4.2. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл находится прямой провод длиной 20 см, концы которого замкнуты вне поля. Сопротивление R всей цепи равно 0,1 Ом. Найти силу F , которую нужно приложить к проводу, чтобы перемещать его перпендикулярно линиям индукции со скоростью 2,5 м/с.

Д4.3. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,4$ Тл в плоскости, перпендикулярной линиям индукции поля, вращается стержень длиной 10 см. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить разность потенциалов $\Delta\phi$ на концах стержня при частоте вращения $\nu = 16$ Гц.

Д4.4. Индуктивность L соленоида длиной $l = 1$ м, намотанного в один слой на немагнитный каркас, равна 1,6 мГн. Площадь S сечения соленоида равна 20 см². Определить число n витков на каждом сантиметре длины соленоида.

Занятие 5. Энергия магнитного поля

5.1. Плоский контур, площадь которого равна 300 см², находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Плоскость контура перпендикулярна линиям индукции. В контуре поддерживается неизменный ток $I = 10$ А. Определить работу A внешних сил по перемещению контура с током за пределы магнитного поля.

5.2. По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной длиной $b = 10$ см, течет ток $I = 20$ А, сила которого поддерживается неизменной. Плоскость квадрата составляет угол $\alpha = 20^\circ$ с линиями индукции однородного магнитного поля ($B = 0,1$ Тл). Вычислить работу A , которую необходимо совершить для того, чтобы вынести провод за пределы поля.

5.3. Соленоид содержит $N = 1000$ витков. Сила тока I в его обмотке равна 1 А, магнитный поток Φ через поперечное сечение соленоида равен 0,1 мВб. Вычислить энергию W магнитного поля.

5.4. На железное кольцо намотано в один слой $N = 200$ витков провода. Определить энергию W магнитного поля, если при токе $I = 2,5$ А магнитный поток Φ в железе равен 0,5 мВб.

5.5. В железном сердечнике индукция магнитного поля равна 1 Тл. Определить магнитную проницаемость железа в этих условиях и плотность энергии магнитного поля.

5.6. Напряженность магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла от $H_1 = 200$ А/м до $H_2 = 800$ А/м. Определить, во сколько раз изменилась объемная плотность энергии w магнитного поля.

5.7. Найти плотность энергии w магнитного поля в железном сердечнике соленоида, если напряженность H намагничивающего поля равна 1,6 кА/м.

5.8. Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет плотность намотки $n = 1000$ м⁻¹. Определить плотность энергии w поля, если по обмотке течет ток $I = 16$ А.

5.9. Обмотка соленоида с железным сердечником содержит $N = 500$ витков. Длина l сердечника равна 50 см. Как и во сколько раз изменится индуктивность L соленоида, если сила тока, протекающего по обмотке, возрастет от $I_1 = 0,1$ А до $I_2 = 1$ А?

Задачи для самостоятельного решения

Д5.1. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл находится прямой провод длиной $l = 8$ см, расположенный перпендикулярно линиям индукции. По проводу течет ток $I = 2$ А. Под действием сил поля провод переместился на расстояние $s = 5$ см. Найти работу A сил поля.

Д5.2. По обмотке соленоида индуктивностью $L = 0,2$ Гн течет ток $I = 10$ А. Определить энергию W магнитного поля соленоида.

Д5.3. Определить объемную плотность энергии w магнитного поля в стальном сердечнике, если индукция B магнитного поля равна 0,5 Тл.

Д5.4. Обмотка тороида содержит $n = 10$ витков на каждый сантиметр длины. Сердечник немагнитный. При какой силе тока I в обмотке плотность энергии w магнитного поля равна 1 Дж/м³?

2. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Основные формулы

Дифференциальное уравнение гармонического незатухающего осциллятора

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0.$$

Уравнение гармонических незатухающих колебаний осциллятора

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где x – колеблющаяся величина; A – амплитуда колебаний; $\omega_0 = 2\pi/T$ – циклическая (круговая) частота собственных незатухающих колебаний; T – период колебаний, φ – начальная фаза колебаний.

Скорость точки, совершающей колебания,

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Ускорение точки, совершающей колебания,

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Сила, под действием которой точка массой m совершает гармонические колебания,

$$F = ma = -A\omega_0^2 m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Кинетическая энергия колеблющейся точки массой m

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi).$$

Потенциальная энергия колеблющейся точки массой m

$$W_p = \frac{mA^2\omega^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi).$$

Полная энергия осциллятора

$$W = W_k + W_p = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

Период незатухающих колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l – длина маятника; g – ускорение свободного падения.

Период незатухающих колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где m – масса маятника; k – коэффициент жесткости пружины.

Период гармонических незатухающих колебаний в электромагнитном контуре (Формула Томсона)

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где L , C – индуктивность и емкость колебательного контура соответственно.

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одной частоты получается гармоническое колебание той же частоты с амплитудой

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

и с начальной фазой, определяемой уравнением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2},$$

где A_1, A_2 – амплитуды складываемых колебаний; φ_1, φ_2 – их начальные фазы.

При сложении двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одной частоты уравнение траектории результирующего движения имеет вид

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Уравнение затухающих колебаний

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

где $A = A_0 e^{-\delta t}$ – текущая амплитуда затухающих колебаний; A_0 – начальная амплитуда; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний, ω_0 – циклическая (круговая) частота собственных колебаний, δ – коэффициент затухания, определяемый одной из формул:

$\delta = \frac{r}{2m}$ – для механических колебаний или $\delta = \frac{R}{2L}$ – для электромагнитных, где r – коэффициент вязкого трения; m – масса колеблющегося тела; R – сопротивление контура; L – индуктивность контура.

Циклическая частота затухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре с сопротивлением R

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Логарифмический декремент затухания

$$\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e},$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$ – период затухающих колебаний; $\tau = \frac{1}{\delta}$ – время релаксации (время, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз); N_e – число колебаний, совершаемых за время уменьшения амплитуды в e раз.

Добротность системы

$$Q = \frac{2\pi W}{\Delta W} = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e,$$

где W – энергия, запасенная в системе, ΔW – энергия, потерянная системой за один период.

Амплитуда и начальная фаза вынужденных механических колебаний

$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_B^2)^2 + 4\delta^2\omega_B^2}}, \quad \varphi_0 = \arctg \frac{2\delta\omega_B}{\omega_0^2 - \omega_B^2},$$

где F_0 – амплитуда внешней периодической силы, действующей с частотой ω_B на материальную точку массой m .

Резонансная частота колебательной системы с затуханием $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$.

Закон Ома для цепи переменного тока, содержащей последовательно соединенные емкость C , индуктивность L и сопротивление R

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

где I_0 и U_0 – амплитуды силы тока и напряжения соответственно; $X_L = \omega L$ – индуктивное реактивное сопротивление; $X_C = 1/(\omega C)$ – емкостное реактивное сопротивление. Эту формулу можно также применять для эффективных значений силы тока и напряжения. Величина, стоящая в знаменателе, называется **полным сопротивлением** или **импедансом**

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Сдвиг фаз между напряжением и током

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Действующее (эффективное) значение силы тока – значение такого постоянного тока, который оказывает такое же тепловое действие за конечный промежуток времени (много больше периода), что и переменный

$$I_{\text{Д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt}.$$

Для переменного тока синусоидальной формы **действующие (эффективные) значения** силы тока и напряжения

$$I_{\text{Д}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{Д}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Уравнение плоской волны, распространяющейся в положительном направлении оси x ,

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где A – амплитуда волны; ω – циклическая частота; φ_0 – начальная фаза волны; $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$ – волновое число (волновой вектор), v – скорость распространения волны, $\lambda = v/\nu$ – длина волны.

Скорость электромагнитной волны в среде $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$,

где c – скорость электромагнитной волны в вакууме; ε , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды соответственно.

Объемная плотность энергии механической волны в среде

$$w = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2,$$

где ρ – плотность среды; A – амплитуда волны; ω – частота волны.

Плотность потока энергии механической волны (вектор Умова) – энергия, переносимая волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны

$$\vec{j} = w\vec{v}.$$

Объемная плотность энергии электромагнитного поля электромагнитной волны в фиксированный момент времени

$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{маг}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{EH}{v},$$

где v – скорость электромагнитной волны.

Вектор плотности потока электромагнитной энергии (вектор Пойтинга)

$$\vec{S} = [\vec{E}; \vec{H}].$$

Вектор \vec{S} направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Среднее по времени значение модуля вектора Пойтинга называется **интенсивностью электромагнитной волны**

$$I = \frac{E_0 H_0}{2}.$$

Примеры решения задач

Пример 2.1. Плоские электромагнитные волны распространяются вдоль некоторого направления в вакууме. Определить, какая энергия переносится волнами за 5 минут через плоскую поверхность площадью 10 см^2 , расположенную перпендикулярно направлению распространения волн. Амплитуда напряженности электрического поля равна 50 мВ/м .

Решение

Так как период электромагнитной волны во много раз меньше времени наблюдения, то естественно рассматривать среднее по времени

значение плотности потока энергии (усредненный по времени модуль вектора Пойтинга)

$$\langle j \rangle = \frac{E_0 H_0}{2}.$$

Выразив значение амплитуды напряженности магнитного поля H_0 через E_0 , получим

$$\langle j \rangle = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2.$$

При этом длина волны должна быть много меньше размеров пластинок, чтобы можно было пренебречь дифракцией, так что частота составляет не менее $c/\lambda \sim 10^{10}$ Гц. Энергия, переносимая за время Δt через поверхность площадью σ , равна

$$\begin{aligned} W = \langle j \rangle \sigma \Delta t &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2 \sigma \Delta t = \\ &= \frac{1}{2} 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^8 (50 \cdot 10^{-3})^2 10^{-3} \cdot 300 \approx 1,0 \text{ мкДж}. \end{aligned}$$

Пример 2.2. Внесший большой вклад в развитие оптики известный американский физик Роберт Вуд любил шутки и розыгрыши. С его именем связано много легенд. Согласно одной из них Вуд однажды, управляя автомобилем, проехал на красный свет. Остановившему его полицейскому Вуд объяснил свой проступок тем, что вследствие эффекта Доплера красный свет ему показался зеленым. Полицейский тоже любил шутить, поэтому согласился принять версию Вуда, однако оштрафовал его за превышение скорости. Определить скорость автомобиля, при которой красный свет с длиной волны 690 нм был бы воспринят водителем как зеленый с длиной волны 550 нм.

Решение

При движении источника света (или приемника) его частота изменится. Теория относительности дает формулу для расчета *регистрируемой* частоты

$$v = v_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta \cos \theta}.$$

Здесь v – частота света, регистрируемая наблюдателем; v_0 – частота, испускаемая неподвижным источником $\beta = \frac{V}{c}$, V – скорость источника относительно наблюдателя; c – скорость света в вакууме; θ – угол между направлением скорости V и направлением наблюдения в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

В нашем случае светофор приближается к наблюдателю (в системе отсчета, связанной с наблюдателем), $\theta = \pi$, поэтому

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}.$$

Так как $\lambda = c/v$, то при переходе к длинам волн формула приобретает вид

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{1-V/c}{1+V/c}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{c-V}{c+V}}.$$

Возведем формулу в квадрат и умножим на $c+V$:

$$\lambda^2 (c+V) = \lambda_0^2 (c-V) \Rightarrow V(\lambda_0^2 + \lambda^2) = c(\lambda_0^2 - \lambda^2).$$

Отсюда найдем скорость V :

$$V = c \frac{\lambda_0^2 - \lambda^2}{\lambda_0^2 + \lambda^2},$$

$$V = 3 \cdot 10^8 \frac{690^2 - 550^2}{690^2 + 550^2} = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,223 = 0,67 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Таким образом, скорость автомобиля Вуда составила 22,3 % от скорости света, следовательно, Вуд явно превысил скорость, допустимую на дорогах США.

Занятие 6. Колебательные процессы. Характеристики колебаний. Колебательный контур

6.1. Точка совершает гармонические колебания по закону синуса с амплитудой 10 см, с частотой $\nu_0 = 0,5$ Гц и начальной фазой 30° . Определить ускорение точки в тот момент времени, когда ее скорость равна 20 см/с.

6.2. Материальная точка массой 10 г совершает гармонические колебания по закону синуса с периодом $T = 2$ с. Амплитуда колебаний 5 см, начальная фаза $\varphi_0 = 0$. Определить: 1) скорость в тот момент времени, когда смещение равно 2,5 см и положительно; 2) максимальную силу, действующую на тело; 3) полную энергию колеблющейся точки.

6.3. Дан график (рис. 2.1) зависимости скорости пружинного маятника от времени. Изобразить схематически график зависимости потенциальной энергии от времени.

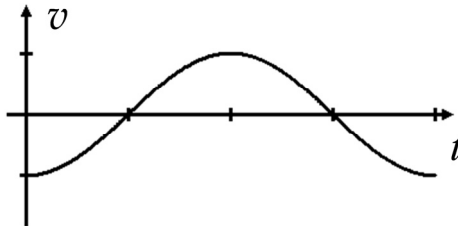


Рис. 2.1

6.4. В колебательном контуре, состоящем из конденсатора и катушки индуктивностью 5,0 мГн, происходят электромагнитные колебания, при которых максимальная сила тока 10 мА. Определить емкость конденсатора, если максимальная разность потенциалов на его обкладках достигает 50 В, а активным сопротивлением катушки можно пренебречь.

6.5. В колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности $L = 10$ мГн и конденсатора емкостью $C = 5$ мкФ, в начальный момент времени заряд на конденсаторе равен нулю, а сила тока в катушке равна 20 мА. Плотность намотки катушки $n = 2000$ м⁻¹. Определить в момент времени $t = 0,2$ мс: 1) силу тока в контуре; 2) заряд на конденсаторе; 3) плотность энергии магнитного поля внутри катушки; 4) маг-

нитный поток, пронизывающий катушку. Активным сопротивлением контура пренебречь.

6.6. Тонкий обруч, подвешенный на гвоздь, вбитый горизонтально в стену, совершает малые колебания в плоскости, параллельной стене. Записать дифференциальное уравнение этих колебаний и определить их период. Определить приведенную длину и положение центра качания. Радиус обруча 30 см.

Задачи для самостоятельного решения

Д6.1. Точка совершает колебания по закону $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$, где $x_0 = 2$ см, $\omega = \pi \text{ с}^{-1}$, $\varphi = \pi/4$ рад. Построить графики зависимости от времени: 1) смещения $x(t)$; 2) скорости $v(t)$; 3) ускорения $a(t)$.

Д6.2. Точка совершает колебания по закону $x = x_0 \sin(\omega t)$. В некоторый момент времени смещение x_1 точки оказалось равным 5 см. Когда фаза колебаний увеличилась вдвое, смещение x_2 стало равным 8 см. Найти амплитуду x_0 колебаний.

Д6.3. Гири, подвешенная к пружине, колеблется по вертикали с амплитудой $x_0 = 4$ см. Определить полную энергию W колебаний гири, если жесткость k пружины равна 1 кН/м.

Д6.4. На стержне длиной $l = 30$ см укреплены два одинаковых грузика – один в середине стержня, другой – на одном из его концов. Стержень с грузиком колеблется около горизонтальной оси, проходящей через свободный конец стержня. Определить приведенную длину L и период T колебаний такой системы. Массой стержня пренебречь.

Д6.5. Колебательный контур имеет индуктивность $L = 1,6$ мГн, емкость $C = 0,04$ мкФ и максимальное напряжение U_0 на зажимах, равное 200 В. Определить максимальную силу тока I_0 в контуре. Сопротивление контура мало.

Занятие 7. Затухающие колебания. Резонанс

7.1. Точка участвует одновременно в трех гармонических однонаправленных колебаниях, описываемых уравнениями $x = \cos(\omega t)$ см, $x = 2\cos(\omega t + \pi/4)$ см, $x = 3\cos(\omega t - \pi/3)$ см. С помощью векторной диаграммы найти амплитуду и фазу результирующего колебания и написать его уравнение.

7.2. За 100 с тело успевает совершить $N = 100$ колебаний, при этом амплитуда уменьшается в e раз. Чему равны коэффициент затухания b , логарифмический декремент затухания λ , добротность системы Q ?

7.3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 25$ мГн, конденсатора емкостью $C = 10$ мкФ и резистора сопротивлением $R = 1$ Ом. Конденсатор заряжен количеством электричества $q_0 = 1$ мКл. Определить: а) период колебаний контура; б) логарифмический декремент затухания колебаний. Записать уравнение изменения напряжения на обкладках конденсатора в зависимости от времени.

7.4. Шарик массой $m = 25$ г подвешен на невесомой пружинке с коэффициентом жесткости $k = 15$ Н/м. Под действием вынуждающей силы устанавливаются вынужденные колебания с частотой $\omega = 20$ с⁻¹. При этом смещение шарика отстает по фазе от вынуждающей силы на $\pi/6$. Найти логарифмический декремент затухания и резонансную частоту $\omega_{\text{рез}}$.

7.5. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 25 мГн, конденсатора емкостью 10 мкФ и резистора сопротивлением 10 Ом. В начальный момент времени заряд конденсатора 2 мКл. Определить период колебаний контура, логарифмический декремент затухания, добротность. Найти сопротивление резистора, при котором не возникают колебания в контуре. Написать уравнение колебаний заряда на конденсаторе.

7.6. Электромагнитный колебательный контур за время $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с потерял 60 % своей первоначальной энергии. Определить индуктивность контура, если его активное сопротивление $R = 10$ Ом. Определить время, за которое энергия колебаний уменьшилась в 5 раз.

7.7. В колебательном контуре совершаются затухающие колебания с частотой $\nu = 10^3$ Гц. Определить частоту ν_0 собственных незатухающих колебаний, если резонансная (по напряжению) частота системы $\nu_{\text{рез}} = 998$ Гц.

7.8. Амплитуды вынужденных гармонических колебаний при частотах $\nu_1 = 400$ Гц и $\nu_2 = 600$ Гц равны между собой. Определить резонансную частоту ν_p .

Задачи для самостоятельного решения

Д7.1. Логарифмический декремент колебаний маятника равен 0,003. Определить число N полных колебаний, которые должен сделать маятник, чтобы амплитуда уменьшилась в два раза.

Д7.2. Тело массой $m = 5$ г совершает затухающие колебания. В течение времени $t = 50$ с тело потеряло 60 % своей энергии. Определить коэффициент сопротивления r .

Д7.3. Определить, насколько резонансная частота отличается от частоты $\nu_0 = 1$ кГц собственных колебаний системы, характеризуемой коэффициентом затухания $b = 400$ с⁻¹.

Д7.4. Период T_0 собственных колебаний пружинного маятника равен 0,55 с. В вязкой среде период T того же маятника стал равным 0,56 с. Определить резонансную частоту $\nu_{\text{рез}}$ колебаний.

Занятие 8. Вынужденные электрические колебания. Переменный ток. Резонанс токов, резонанс напряжений

8.1. В постоянном магнитном поле индукции $B = 1$ Тл с угловой скоростью 6,28 рад/с вращается рамка площадью 10 см². Вектор магнитной индукции перпендикулярен оси рамки. Определить ЭДС индукции, возникающую в рамке, и силу тока в ней, если рамка замкнута и ее сопротивление 0,01 Ом.

8.2. Найти эффективное и среднее значение силы тока прямоугольных импульсов, период которых в 4 раза больше их длительности, а максимальное значение 0,80 А.

8.3. В цепь переменного тока частотой 50 Гц с эффективным напряжением 220 В подключены последовательно катушка индуктивностью 0,5 Гн и активным сопротивлением 10 Ом и конденсатор емкостью 10 мкФ. Определить эффективную силу тока и эффективную мощность. Построить векторную диаграмму.

8.4. Определить резонансную частоту схемы в задаче 8.3. Какова будет резонансная частота, если активное сопротивление увеличить до 100 Ом? Построить векторную диаграмму для этого случая.

8.5. Определить эффективное значение силы тока, эффективную мощность и сдвиг фаз между током и напряжением, если проводник сопротивлением 150 Ом и конденсатор емкостью 5,0 мкФ включены

параллельно в цепь переменного тока эффективным напряжением 120 В и частотой 50 Гц.

8.6. Схема (рис. 2.2) с параллельным колебательным контуром ($L = 10$ мГн, $C = 1$ мкФ) и активным сопротивлением $R = 100$ Ом питается эффективным переменным напряжением 10 В. Найти эффективное напряжение между точками A и B при резонансной частоте. Каково будет напряжение при частотах в 10 раз больше и в 10 раз меньше резонансной?

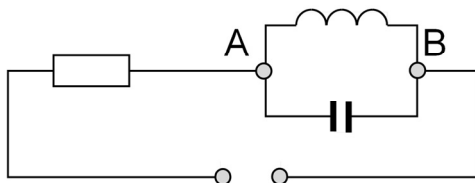


Рис. 2.2

Задачи для самостоятельного решения

Д8.1. Определить емкость конденсатора, который в цепи переменного тока с частотой 50 Гц оказывает такое же сопротивление, как и резистор с сопротивлением 100 Ом.

Д8.2. В сеть эффективным напряжением 220 В включены последовательно катушка индуктивностью 0,16 Гн и резистор сопротивлением 2 Ом, а также конденсатор емкостью 64 мкФ. Определить эффективную силу тока в цепи, если частота его 200 Гц. При какой частоте наступит резонанс напряжений и каковы будут при этом эффективные сила тока и напряжение на зажимах катушки, конденсатора и резистора?

Д8.3. Определить активное сопротивление колебательного контура, индуктивность которого 1 Гн, если через 0,1 с после начала колебаний амплитудное значение разности потенциалов на обкладках конденсатора уменьшилось в 4 раза.

Д8.4. Определить резонансную частоту колебательного контура, который состоит из конденсатора емкостью 2 мкФ и катушки длиной 0,1 м и радиусом 1 см, содержащей 500 витков, если магнитная проницаемость среды, заполняющей катушку, $\mu = 1$, а сопротивление катушки равно 20 Ом.

Занятие 9. Волновые процессы. Звук

9.1. Продольная плоская волна распространяется вдоль оси x со скоростью $v = 100$ м/с (рис. 2.3). На рисунке изображена зависимость смещения частиц среды ξ от x для момента времени $t = 0$. Напишите уравнение данной волны.

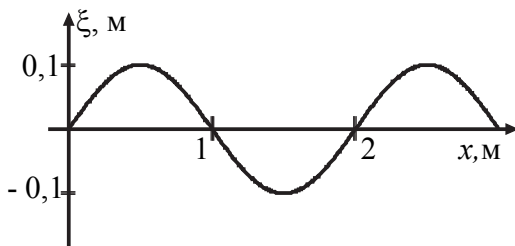


Рис. 2.3

9.2. Плоская звуковая волна возбуждается источником колебаний частоты $\nu = 200$ Гц. Амплитуда x_0 колебаний источника равна 4 мм. Написать уравнение колебаний источника $\xi(0, t)$, если в начальный момент смещение точек источника максимально. Найти смещение $\xi(x, t)$ точек среды, находящихся на расстоянии $x = 100$ см от источника, в момент $t = 0,1$ с. Скорость v звуковой волны принять равной 300 м/с. Затухания нет.

9.3. Две точки находятся на расстоянии $\Delta x = 50$ см друг от друга на прямой, вдоль которой распространяется волна со скоростью $v = 50$ м/с. Период T колебаний равен 0,05 с. Найти разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний в этих точках.

9.4. Найти скорость v распространения продольных упругих колебаний в следующих металлах: 1) алюминии, 2) меди, 3) вольфраме.

9.5. Скорость v звука в некотором газе при нормальных условиях равна 308 м/с. Плотность ρ газа равна $1,78$ кг/м³. Определить отношение c_p/c_V для данного газа.

9.6. Во сколько раз изменяется длина ультразвуковой волны при переходе волны из стали в медь, если скорости распространения ультразвука в меди и стали соответственно 3600 и 5500 м/с?

9.7. Мощность N изотропного точечного источника звуковых волн равна 10 Вт. Какова средняя объемная плотность $\langle w \rangle$ энергии на рас-

стоянии $r = 10$ м от источника волн? Температуру T воздуха принять равной 250 К.

9.8. Точка M находится на расстоянии $r = 1,5$ м от точечного изотропного источника звука частотой $\nu = 600$ Гц, мощность которого $P = 0,8$ Вт. Найдите амплитуду колебаний частиц среды в точке M и сравните ее с длиной волны звука λ . Скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с.

9.9. Во сколько раз изменится частота основного тока натянутой струны, если ее длину уменьшить на 35 %, а натяжение оставить прежним?

9.10. Поезд проходит мимо станции со скоростью $u = 40$ м/с. Частота ν_0 тона гудка электровоза равна 300 Гц. Определить кажущуюся частоту ν тона для человека, стоящего на платформе, в двух случаях: 1) поезд приближается; 2) поезд удаляется.

Задачи для самостоятельного решения

Д9.1. Звуковые колебания, имеющие частоту $\nu = 0,5$ кГц и амплитуду $\xi_0 = 0,25$ мм, распространяются в упругой среде. Длина волны $\lambda = 70$ см. Найти:

1) скорость распространения волн; 2) максимальную скорость v_0 частиц среды.

Д9.2. Определить разность фаз $\Delta\phi$ колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на $x = 2$ м от источника. Частота ν колебаний равна 5 Гц, волны распространяются со скоростью $v = 40$ м/с.

Д9.3. Определить максимальное и минимальное значения длины λ звуковых волн, воспринимаемых человеческим ухом, соответствующие граничным частотам $\nu_1 = 16$ Гц и $\nu_2 = 20$ кГц. Скорость звука принять равной 340 м/с.

Д9.4. Интенсивность звука $I = 1$ Вт/м². Определить среднюю объемную плотность $\langle w \rangle$ энергии звуковой волны, если звук распространяется в сухом воздухе при нормальных условиях.

Занятие 10. Электромагнитные волны

10.1. В однородной и изотропной среде распространяется плоская электромагнитная волна со скоростью $v = 1,5 \cdot 10^8$ м/с. Амплитуда напряженности магнитного поля волны $H_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ А/м. Магнитная

проницаемость среды $\mu = 2$. Найти амплитуду напряженности электрического поля волны.

10.2. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна, магнитная составляющая которой $H = 0,05 \cos(\omega t - 30x + 4y)$ А/м. Найти частоту этой волны и средний за период поток энергии, проходящий через плоскую поверхность площадью $S = 100 \text{ см}^2$, расположенную перпендикулярно оси x .

10.3. Написать уравнение для электрической составляющей плоской электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме вдоль оси x , если амплитудное значение магнитной составляющей волны $H_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ А/м, а длина волны $\lambda = 10^{-6}$ м. Начальная фаза волны $\varphi = \pi/3$.

10.4. В однородной и изотропной среде распространяется плоская электромагнитная волна. Интенсивность волны $I = 15 \text{ мВт/м}^2$, а амплитуда напряженности электрического поля в волне $E_0 = 3 \text{ В/м}$. Найти скорость распространения волны. Магнитная проницаемость среды $\mu = 1$.

10.5. Электромагнитная волна с частотой $\nu = 5 \text{ МГц}$ переходит из вакуума в немагнитную среду с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9$. Найти изменение длины волны.

10.6. Солнечная постоянная (интенсивность солнечного света за пределами атмосферы на орбите Земли) равна 1400 Вт/м^2 . Определить амплитудное значение напряженности электрического поля в волне.

10.7. Длина волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме $0,633 \text{ мкм}$. Какова длина волны этого излучения в воде ($n = 1,33$)? Какова частота этого излучения?

10.8. Мощность лазерной указки 1 мВт , длина волны $0,639 \text{ мкм}$, диаметр пучка 2 мм . Определить частоту излучения и напряженности электрического E и магнитного H полей в стекле ($n = 1,5$). Определить интенсивность света лазерной указки.

10.9. В однородной и изотропной среде распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны 10 В/м , а магнитного – 46 мА/м . Магнитная проницаемость среды $\mu = 1$. Найти диэлектрическую проницаемость среды.

Задачи для самостоятельного решения

Д10.1. Определить энергию, которую переносит за время $t = 1$ мин распространяющаяся в вакууме плоская электромагнитная волна через площадку $S = 10 \text{ см}^2$, расположенную перпендикулярно скорости волны. Амплитуда напряженности электрического поля волны 1 мВ/м , а период $T \ll t$.

Д10.2. Электромагнитная волна с частотой 3 МГц переходит из вакуума в немагнитную среду. При этом длина волны уменьшается на 10 м . Найти диэлектрическую проницаемость среды.

Д10.3. Для демонстрации опытов Герца с преломлением электромагнитных волн иногда берут большую призму, изготовленную из парафина. Определить показатель преломления парафина, если его диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2$ и магнитная проницаемость $\mu = 1$.

Д10.4. Два параллельных провода, погруженных в глицерин, индуктивно соединены с генератором электромагнитных колебаний частотой $\nu = 420 \text{ МГц}$. Расстояние между пучностями стоячих волн на проводах равно 7 см . Найти диэлектрическую проницаемость ϵ глицерина. Магнитную проницаемость μ принять равной единице.

Занятие 11. Коллоквиум

На коллоквиум выносятся разделы физики «Электромагнетизм» и «Колебания и волны». Коллоквиум сдается в письменном виде в течение одной пары на практическом занятии. Билет включает теоретические вопросы по обоим разделам и практические задания.

3. ОПТИКА

Основные формулы

Оптический ход L волны – геометрическое расстояние l , пройденное волной, умноженное на показатель преломления среды (в однородной среде)

$$L = nl.$$

Условие интерференционного максимума при наложении двух когерентных волн от двух синфазных источников

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

где Δ – оптическая разность хода интерферирующих волн, равна целому числу длин волн.

Условие интерференционного минимума

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

оптическая разность хода равна нечетному числу полуволен.

При отражении от оптически более плотной среды фаза волны меняется скачкообразно на $\pi/2$, что можно выразить уменьшением или увеличением оптического хода волны на $\lambda/2$.

При отражении от тонких пластинок и пленок, находящихся в среде, интерферируют между собой два луча, отраженных от наружной и внутренней поверхности. В этом случае **условие максимума**

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - n_0^2} \sin^2 i \pm \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где h – толщина пластинки; n – показатель преломления пластинки; n_0 – показатель преломления среды, окружающей пластинку; i – угол падения света на пластинку.

Условие минимума для этого же случая

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (и светлых – в проходящем)

$$r_m = \sqrt{Rm\lambda}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где R – радиус кривизны поверхности линзы; m – номер кольца.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (и темных – в проходящем)

$$r_m = \sqrt{(2m - 1)R\frac{\lambda}{2}}, \quad (m = 1, 2, \dots).$$

Условие максимумов при дифракции на щели

$$b \sin \varphi = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, \dots),$$

где b – ширина щели; φ – направление дифракции, отсчитываемое от нормали к плоскости щели.

Условие минимумов при дифракции на щели шириной b

$$b \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad (m = 1, 2, \dots).$$

Условие главных максимумов при дифракции на плоской дифракционной решетке

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где d – период решетки; φ определяется аналогично дифракции на щели.

Условие дополнительных минимумов при дифракции на плоской дифракционной решетке

$$d \sin \varphi = \pm \frac{m'}{N}\lambda, \quad (m' = 1, 2, 3, \dots, m' \neq 0, N, 2N, 3N, \dots),$$

где N – число щелей решетки, участвующих в образовании дифракции.

Угловая дисперсия D определяет угловое расстояние между двумя спектральными линиями

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi} \quad (\text{в данном случае } d\lambda = \lambda_2 - \lambda_1).$$

Таким образом, чем выше порядок спектра и меньше период решетки, тем больше угловая дисперсия. Она не зависит от числа щелей в решетке и характеризует степень растянутости спектра в области данной длины волны.

Разрешающей способностью решетки называют безразмерную величину $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$, где $\delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, при которой эти линии воспринимаются раздельно:

$$\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1, \quad \lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2,$$

$R = mN$, m – порядок спектра, N – общее число щелей решетки.

Угол Брюстера i_B – угол падения света на границу раздела двух сред, при котором отраженный луч максимально поляризован:

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

где n_{21} – относительный показатель преломления сред.

Закон Малюса

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

где I – интенсивность света, вышедшего из поляризатора; I_0 – интенсивность линейно поляризованного света, падающего на поляризатор, α – угол между световым вектором падающего света и осью поляризатора. Если свет проходит последовательно через два поляризатора (поляризатор и анализатор), то можно считать, что α – угол между осями поляризатора и анализатора.

Примеры решения задач

Пример 3.1. Найти построением ход луча 2 за собирающей и рассеивающей линзами (рис. 3.1), если ход луча 1 известен. Лучи считать параксиальными.

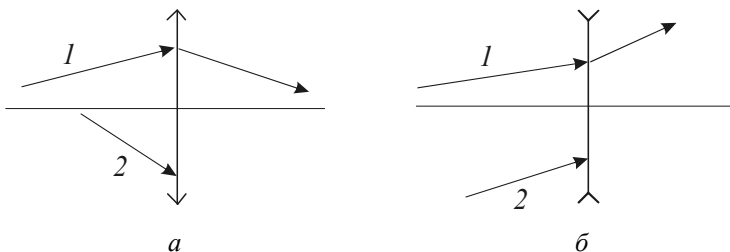


Рис. 3.1

Решение

Чтобы продолжить ход лучей 2 за линзами, необходимо знать положение фокусов. Воспользуемся тем, что линза фокусирует любой параллельный пучок лучей на фокальную плоскость (в случае рассеивающей линзы – продолжения лучей). Взяв вторым лучом параллельного пучка луч l' , проходящий через центр линзы (рис. 3.2, a и $б$), определяем положение фокальных плоскостей по побочным фокусам F_1 .

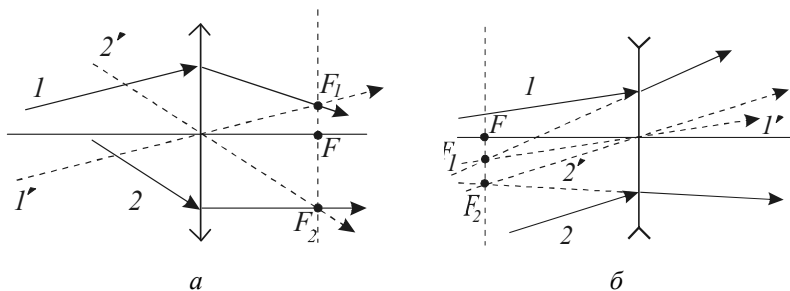


Рис. 3.2

Аналогично, построив лучи $2'$, параллельные лучам 2 и проходящие через центры линз, получим побочные фокусы F_2 , через которые и проходит преломленный луч 2 (рис. 3.2, a) или его продолжение (рис. 3.2, $б$).

Пример 3.2. В опыте Ллойда (рис. 3.3) при некотором положении источника S_1 ширина интерференционных полос на экране $\Delta x = 0,25$ мм. После того как источник отодвинули от зеркала на $\Delta h = 0,60$ мм (положение S'_1), эта ширина уменьшилась в 1,5 раза. Расстояние от источника до экрана $L = 100$ см. Найти длину волны света.

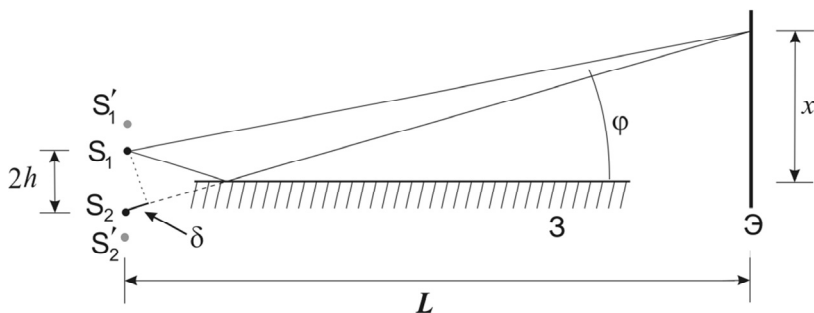


Рис. 3.3

Решение

Положение и ширина интерференционных полос на экране определяются разностью хода Δ световых волн от источника S_1 и его мнимого изображения $S_2 - \Delta = \delta + \lambda/2$ (половину длины волны следует добавлять, так как при отражении от зеркала фаза волны изменяется на π). Для соседних минимумов на экране имеем:

$$\Delta n = \delta n + \lambda/2 = (2n + 1)(\lambda/2),$$

$$\Delta n + 1 = \delta n + 1 + \lambda/2 = (2n + 3)(\lambda/2).$$

Ввиду малости углов φ и отношения h/L (на рисунке эти величины сильно преувеличены) можно считать, что $\delta \approx 2h \sin\varphi \approx 2h (x/L)$ и

$$\Delta n + 1 - \Delta n = \lambda = \delta n + 1 - \delta n \approx$$

$$\approx 2h (xn + 1/L) - 2h (xn/L) = 2h (\Delta x/L),$$

отсюда

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{2h}.$$

Аналогично для нового положения источника S'_1

$$(\Delta x)' = \frac{\lambda L}{2h'}.$$

Кроме того, по условию

$$h' - h = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$\frac{\Delta x}{(\Delta x)' } = 1,5.$$

Решив систему уравнений, получим

$$h = 2\Delta h = 1,2 \text{ мм},$$

$$\lambda = \frac{2h\Delta x}{L} = 0,60 \text{ мкм}.$$

Пример 3.3. На плоскую дифракционную решетку, содержащую $N = 50\,000$ штрихов, падает нормально свет от двойной линии натрия ($\lambda_1 = 589,0$ нм; $\lambda_2 = 589,6$ нм). Число штрихов, приходящееся на 1 см длины решетки, равно $n = 5000$. Какой максимальный порядок спектра m можно получить от такой решетки и каково минимальное расстояние δl между спектральными линиями, которое может разрешить решетка в указанной области спектра? Спектр максимального порядка фиксируется на фотопластинке с помощью объектива с фокусным расстоянием $f = 50$ см. Какое расстояние между спектральными линиями λ_1 и λ_2 получится на фотопластинке?

Решение

Направление дифракционного максимума порядка m определяется уравнением

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

где d – период решетки, в данном случае равный 2 мкм. Поскольку угол дифракции меньше $\pi/2$, максимальный порядок спектра равен целой части отношения d/λ , в нашем случае $m = 3$.

Разрешающая сила решетки $\frac{\lambda}{(\delta\lambda)_{\min}} = mN$, отсюда

$$(\delta\lambda)_{\min} = \frac{\lambda}{mN} \approx \frac{6 \cdot 10^{-7}}{3.5 \cdot 10^4} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 4 \text{ пм.}$$

Эта разность в 150 раз меньше интервала между линиями дублета натрия, т. е. последний очень хорошо разрешен.

Расстояние между изображениями линий на фотопластинке δx определяется разностью углов дифракции $\delta\varphi - \delta x = f \delta\varphi$ (считаем направление светового потока нормальным к фотопластинке). Продифференцировав первое уравнение, можно получить величину $\delta\varphi$:

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

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

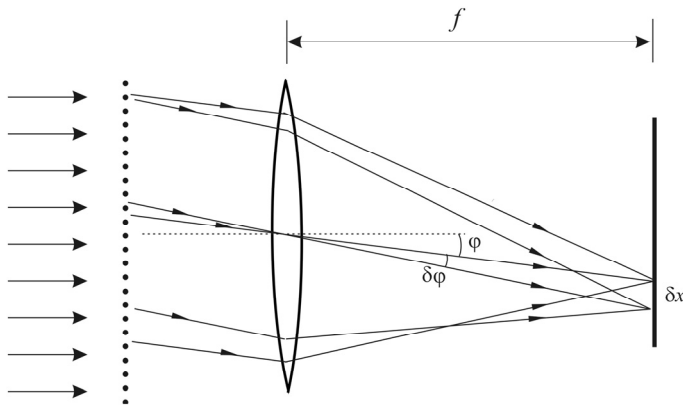


Рис. 3.4

Ввиду относительной малости $\delta\varphi$ и $\delta\lambda$ ими вполне можно заменить бесконечно малые в последнем выражении

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

Таким образом, расстояние между линиями на фотопластинке равно

$$\delta x = \frac{fm\delta\lambda}{d\cos\varphi} = \frac{fm\delta\lambda}{d\sqrt{1-\sin^2\varphi}} = \frac{fm\delta\lambda}{d\sqrt{1-\left(\frac{m\lambda}{d}\right)^2}} \approx 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,0 \text{ мм}.$$

Пример 3.4. На щель шириной b падает нормально световой поток с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$. Оценить минимальный размер a_{\min} изображения щели на экране, расположенном на расстоянии $L = 1,5 \text{ м}$ от щели.

Решение

При достаточно большой ширине щели размеры ее «изображения» определяются законами геометрической оптики и в данном случае совпадают с размерами самой щели. Ширина проекции щели в этом случае относительно большая. При уменьшении b усиливается дифракция, и в пределе изображением щели на экране следует считать центральный дифракционный максимум. При малой щели ширина центрального максимума будет также относительно большой. Таким образом, у изображения щели есть минимум. Ширина центрального минимума определяется направлениями на первые минимумы интенсивности при дифракции от щели

$$b\sin\varphi = \pm 1 \cdot \lambda.$$

Отсюда

$$\varphi_1 = \frac{\lambda}{b}, \quad \varphi_{-1} = -\frac{\lambda}{b}, \quad \Delta\varphi = \frac{2\lambda}{b},$$

в силу малости угла синус равен тангенсу и самому углу.

Ширина максимума на экране равна (опять же в силу малости угла)

$$\Delta x = L\Delta\varphi = \frac{2\lambda L}{b}.$$

Размер изображения будет минимален, если оба указанных случая дадут одинаковый результат (так как в первом случае a уменьшается с уменьшением b , а во втором a увеличивается). Таким образом,

$$b = \frac{2\lambda L}{b}.$$

Отсюда

$$b_m = \sqrt{2\lambda L},$$

$$a_{\min} = b_m = \sqrt{2\lambda L} \approx 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,34 \text{ мм}.$$

Пример 3.5. Пучок частично поляризованного (линейно) света со степенью поляризации 0,5 проходит последовательно через два поляризатора, первый из которых ориентирован так, что пропускает максимум падающего светового потока, а плоскость пропускания второго повернута на $\varphi = 60^\circ$ относительно плоскости пропускания первого. Найти коэффициент пропускания системой данного светового пучка. Коэффициент отражения (по интенсивности) от каждой из двух поверхностей каждого поляризатора $\rho = 0,04$.

Решение

Сначала выясним соотношение интенсивностей естественной и поляризованной компонент в исходном пучке. Пусть интенсивности падающего света, прошедшего через первый поляризатор и прошедшего через второй равны I_0 , I_1 и I_2 соответственно. Степень поляризации падающего света определяется как

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = 0,5,$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимум и минимум интенсивности частично поляризованного света, прошедшего через идеальный поляризатор при его вращении.

Интенсивность частично поляризованного света можно представить в виде суммы интенсивностей поляризованной и естественной компонент: $I_0 = I_{\text{пол}} + I_{\text{ест}}$. Поляризованную компоненту, в свою очередь, можно считать гармонической волной с амплитудой светового вектора E_{\parallel} , а естественная компонента представима в виде суперпозиции независимых (со случайным сдвигом фаз) линейно поляризованных гармонических волн с равными по модулю и взаимно перпендикулярными амплитудами E_{\parallel} и E_{\perp} (рис. 3.5).

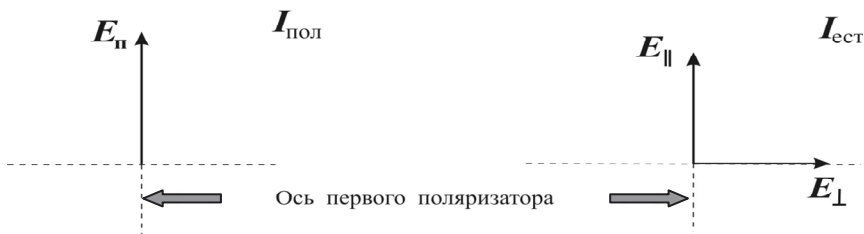


Рис. 3.5

Без нарушения общности можно считать, что направления E_{\parallel} и E_{\perp} одинаковы.

Так как E_{\parallel} и E_{\perp} не интерферируют, то

$$I_{\text{ест}} = I_{\parallel} + I_{\perp} = 2I_{\parallel} \sim E_{\parallel}^2 + E_{\perp}^2.$$

По условию для идеального поляризатора $I_{\text{max}} = I_{\text{пол}} + \frac{1}{2}I_{\text{ест}}$ (проходят только составляющие, параллельные оси поляризатора). При повороте поляризатора на 90° пройдет только половина интенсивности естественной составляющей, и это будет I_{min} :

$$I_{\text{min}} = \frac{1}{2}I_{\text{ест}}.$$

Подставим это выражение в формулу для степени поляризации:

$$0,5 = \frac{I_{\text{пол}} + 0,5I_{\text{ест}} - 0,5I_{\text{ест}}}{I_{\text{пол}} + 0,5I_{\text{ест}} + 0,5I_{\text{ест}}}.$$

Отсюда $I_{\text{пол}} = I_{\text{ест}}$, $I_0 = I_{\text{пол}} + I_{\text{ест}} = 2I_{\text{ест}}$.

Вернемся к условию задачи. Первый поляризатор не пропускает компоненту E_{\perp} и, кроме того, ослабляет свет в результате двух отражений. Следовательно,

$$\begin{aligned} I_1 &= (1 - \rho)^2 (I_{\text{пол}} + 0,5I_{\text{ест}}) = \\ &= (1 - \rho)^2 (I_{\text{ест}} + 0,5I_{\text{ест}}) = 1,5I_{\text{ест}}(1 - \rho)^2. \end{aligned}$$

Поскольку прошедший через первый поляризатор свет полностью поляризован вдоль оси поляризатора, интенсивность I_2 определяется по закону Малюса с учетом двойного отражения от поверхностей второго поляризатора:

$$I_2 = (1 - \rho)^2 I_1 \cos^2 \varphi = 1,5 I_{\text{ест}} (1 - \rho)^4 \cos^2 \varphi.$$

Искомый коэффициент пропускания системы

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{1,5 I_{\text{ест}} (1 - \rho)^4 \cos^2 \varphi}{2 I_{\text{ест}}} = \frac{1,5 \cdot 0,96^4 \cdot 0,5^2}{2} = 0,16.$$

Пример 3.6. Две стеклянные пластинки толщиной 2 и 4 мм пропускают соответственно 90 и 88 % падающего на них нормально света. Какой толщины пластинку из того же стекла следует взять, чтобы ее коэффициент пропускания был равен 80 %?

Решение

Коэффициенты пропускания пластинок K_1 , K_2 и K_3 определяются коэффициентом поглощения стекла α , толщиной пластинок L и коэффициентом отражения ρ от каждой поверхности пластинок:

$$K_1 = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha L_1},$$

$$K_2 = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha L_2},$$

$$K_3 = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha L_3}.$$

Из первых двух уравнений получим

$$\frac{K_1}{K_2} = e^{\alpha(L_2 - L_1)}, \quad \alpha = \frac{\ln \frac{K_1}{K_2}}{L_2 - L_1}; \quad (1 - \rho)^2 = K_1 e^{\frac{L_1 - L_2}{L_2 - L_1} \ln \frac{K_1}{K_2}}.$$

Подставив данные из условия, находим

$$\alpha \approx 11,2 \text{ м}^{-1}, \quad (1 - \rho)^2 \approx 0,920.$$

Из третьего уравнения системы получим

$$L_3 = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(1-\rho)^2}{K_3} \approx 0,0125 \text{ м} = 12,5 \text{ мм.}$$

Занятие 12. Интерференция света

12.1. Оценить длину и радиус когерентности солнечного света. Угловой диаметр Солнца $0,5^\circ$, интервал длин волн видимого излучения принять $400 \dots 760 \text{ нм}$.

12.2. На бипризму Френеля падает свет ($\lambda = 600 \text{ нм}$) от источника. Найти расстояние между соседними интерференционными минимумами на экране, если расстояние от источника до призмы 1 м , а от призмы до экрана 4 м . Преломляющий угол призмы $0,002 \text{ рад}$, ее показатель преломления $1,5$.

12.3. Интерференционная картина на экране получается с помощью схемы, изображенной на рис. 3.6. Источник S_1 , находящийся на расстоянии $L = 1 \text{ м}$ от экрана, излучает монохроматический свет ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$). Плоскость зеркала параллельна лучу S_1A и удалена от него на расстояние $h = 2 \text{ мм}$. Что будет наблюдаться в точке A (усиление или гашение света) при интерференции лучей S_1A и S_1BA ? Как изменится освещенность в этой точке, если на пути луча S_1A , перпендикулярно ему поместить плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n = 1,55$) толщиной $d = 6 \text{ мкм}$?

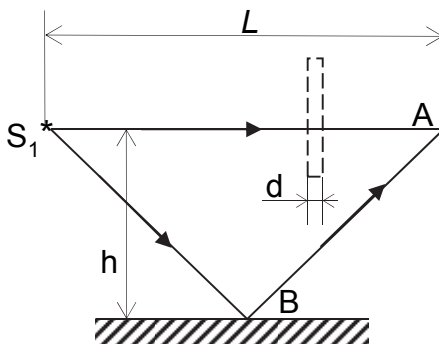


Рис. 3.6

12.4. На плоской поверхности прозрачного стекла образована тонкая прозрачная пленка толщиной $0,396$ мкм. Какую окраску примет пленка при освещении ее белым светом, падающим под углом 30° ? Показатель преломления стекла $1,5$, а материала пленки $1,4$.

12.5. На стеклянную пластинку ($n_1 = 1,5$) нанесена прозрачная пленка ($n_2 = 1,4$). На пленку нормально к поверхности падает монохроматический свет ($\lambda = 600$ нм). Какова наименьшая толщина пленки, при которой в результате интерференции отраженные лучи максимально ослаблены?

12.6. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Каков ее показатель преломления, если при наблюдении в отраженном свете ($\lambda = 600$ нм) радиус 10 -го темного кольца Ньютона $2,1$ мм? Радиус кривизны линзы 1 м.

12.7. В интерферометре Майкельсона одно из зеркал сдвинулось вдоль луча света. Интерференционная картина при этом сместилась на 5 полос. Найти перемещение зеркала ($\lambda = 600$ нм).

Задачи для самостоятельного решения

Д12.1. Определить длину l_1 отрезка, на котором укладывается столько же длин волн в вакууме, сколько их укладывается на отрезке $l_2 = 3$ мм в воде.

Д12.2. Расстояние d между двумя когерентными источниками света ($\lambda = 0,5$ мкм) равно $0,1$ мм. Расстояние b между интерференционными полосами на экране в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определить расстояние l от источников до экрана.

Д12.3. На мыльную пленку ($n = 1,3$), находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине d пленки отраженный свет с длиной волны $\lambda = 0,55$ мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

Д12.4. Плосковыпуклая линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определить толщину d слоя воздуха, где в отраженном свете ($\lambda = 0,6$ мкм) видно первое кольцо Ньютона.

Занятие 13. Дифракция света

13.1. В точке A находится точечный источник монохроматического света ($\lambda = 500$ нм). Диафрагма (рис. 3.7) с отверстием радиусом 1 мм перемещается из точки, отстоящей от A на 50 см, в точку, отстоящую от A на 1,5 м. Сколько раз будет наблюдаться затемнение в точке B , если $|AB| = 2$ м?

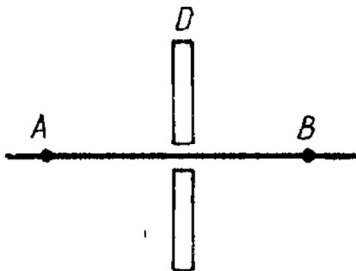


Рис. 3.7

13.2. На щель шириной 0,1 мм падает нормально пучок монохроматического света ($\lambda = 500$ нм). Дифракционная картина наблюдается на экране, находящемся в фокальной плоскости линзы, оптическая сила которой $D = 5$ дптр. Найти расстояние между минимумами во втором порядке.

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

13.4. Что произойдет с дифракционной картиной, если щели дифракционной решетки перекрыть через одну?

13.5. Какой наибольший порядок спектра натрия ($\lambda = 590$ нм) можно наблюдать при помощи дифракционной решетки, имеющей 500 штрихов на 1 мм, если свет падает на решетку под углом 30° ?

13.6. Какое число штрихов должна иметь дифракционная решетка для того, чтобы разрешить в спектре первого порядка линии желтого дублета (двойной желтой спектральной линии) натрия, длины волн которого равны 589,0 и 589,6 нм?

13.7. На дифракционную решетку нормально падает пучок монохроматического света шириной 3 мм. Постоянная дифракционной решетки 0,01 мм, экран расположен на расстоянии 0,5 м, длина волны 0,63 мкм. Оценить линейную и угловую ширину максимума первого порядка.

Задачи для самостоятельного решения

Д13.1. На диафрагму с круглым отверстием диаметром $d = 4$ мм падает нормально параллельный пучок лучей монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии $b = 1$ м от него. Сколько зон Френеля укладывается в отверстии? Темное или светлое пятно получится в центре дифракционной картины, если в месте наблюдений поместить экран?

Д13.2. На щель шириной $a = 0,05$ мм падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Определить угол φ между первоначальным направлением пучка света и направлением на четвертую темную дифракционную полосу.

Д13.3. Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете ($\lambda = 0,6$ мкм) максимум пятого порядка отклонен на угол $\varphi = 18^\circ$?

Д13.4. Нормально поверхности дифракционной решетки падает пучок света. За решеткой помещена собирающая линза с оптической силой $D = 1$ дптр. В фокальной плоскости линзы расположен экран. Определить число n штрихов на 1 мм этой решетки, если при малых углах дифракции линейная дисперсия $D_l = 1$ мм/нм.

Занятие 14. Поляризация света

14.1. Чему равен угол полной поляризации вещества, у которого предельный угол полного внутреннего отражения равен 42° ?

14.2. Анализатор в 2 раза ослабляет интенсивность падающего на него поляризованного света. Каков угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора? Потерями света на отражение пренебречь.

14.3. Во сколько раз ослабевает естественный свет, проходя через два николя, главные плоскости которых составляют между собой угол 63° , если в каждом из николей теряется 10 % падающего света?

14.4. Частично поляризованный свет проходит через николю. При повороте николя на 45° относительно положения, соответствующего максимальной интенсивности выходящего пучка, интенсивность света уменьшается в 1,5 раза. Определить отношение интенсивностей в естественной и поляризованной части падающего пучка.

14.5. Естественный свет проходит через систему из двух одинаковых несовершенных поляризаторов. Каждый из них пропускает в сво-

ей плоскости $\alpha_1 = 0,95$ часть интенсивности соответствующего колебания и обуславливает степень поляризации $P = 0,9$. Какую долю первоначальной интенсивности света составляет интенсивность света, прошедшего через эту систему, если плоскости поляризаторов взаимно перпендикулярны (поляризаторы скрещены)?

14.6. Раствор сахара, налитый в трубку длиной 18 см, помещенную между поляризаторами, поворачивает плоскость колебаний желтых лучей натриевого пламени на 30° . Какова масса сахара, находящегося в растворе объемом 1 м^3 , если удельное вращение сахара для желтых лучей натрия составляет $0,667 \text{ град}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг})$?

14.7. Между двумя скрещенными поляризаторами находится клиновидная пластинка, вырезанная из исландского шпата так, что оптическая ось пластинки параллельна ребру клина. Угол при вершине клина $\theta = 4,72'$. Ось пластинки образует с плоскостями поляризаторов углы, равные 45° . Найти расстояние Δx между серединами светлых полос, наблюдаемых за вторым поляризатором при прохождении через систему света с $\lambda = 486 \text{ нм}$. Для этой длины волны показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного лучей составляют $n_o = 1,668$ и $n_e = 1,491$.

14.8. Естественный свет падает на плоскую грань двоякопреломляющего кристалла (рис. 3.8). Построить по принципу Гюйгенса направления распространения обыкновенного и необыкновенного лучей. Указать характер их поляризации. Направление оптической оси указано пунктиром. Кристалл положительный.

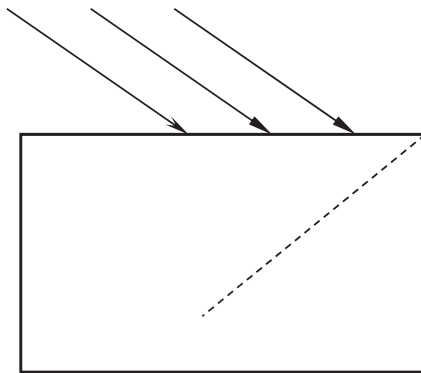


Рис. 3.8

Задачи для самостоятельного решения

Д14.1. Угол Брюстера i_B при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен 57° . Определить скорость света в этом кристалле.

Д14.2. Угол α между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до 60° ?

Д14.3. На пути частично поляризованного света (степень поляризации $P = 0,6$) поставили анализатор так, что интенсивность света, прошедшего через него, стала максимальной. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если плоскость пропускания анализатора повернуть на угол $\alpha = 30^\circ$?

Д14.4. Раствор глюкозы с массовой концентрацией $C_1 = 280 \text{ кг/м}^3$, содержащийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через этот раствор, на угол $\varphi_1 = 32^\circ$. Определить массовую концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе, налитом в трубку такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_1 = 24^\circ$.

4. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Основные формулы

Абсолютно черное тело (АЧТ) – тело, которое поглощает всё падающее на него излучение независимо от его спектрального состава, направления и поляризации, ничего не отражая и ничего не пропуская.

Энергетическая светимость тела R – отношение энергии излучения с поверхности тела во всех направлениях, по всем частотам и всех поляризации к интервалу времени излучения и площади поверхности:

$$R = \frac{\delta W}{\delta t \delta S}.$$

Мощность излучения тела в целом получается в общем случае интегрированием светимости по поверхности

$$\frac{dW}{dt} = \int_S R dS.$$

Закон Стефана–Больцмана связывает энергетическую светимость абсолютно черного тела и его температуру:

$$R^{\text{АЧТ}} = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана, T – термодинамическая температура тела.

Спектральная плотность энергетической светимости тела r_ν (или r_λ) – отношение поверхностной плотности мощности излучения в малом интервале частот (длин волн) к величине этого интервала

$$r_{\nu} = \frac{\delta R}{\delta \nu}, \quad r_{\lambda} = \frac{\delta R}{\delta \lambda}.$$

В литературе эта величина именуется также **излучательностью, излучательной способностью, испускательной способностью.**

Интегральный коэффициент поглощения a участка поверхности тела или тела в целом – доля энергии падающего на поверхность излучения, поглощаемая телом:

$$a = \frac{W_{\text{погл.}}}{W_{\text{пад}}}.$$

Спектральный коэффициент поглощения на данной частоте (длине волны) a_{ν} (a_{λ}) определяется аналогично, но для излучения в узком интервале частот (длин волн). Для него используется также термин **поглощательная способность.** У **АЧТ** $a_{\nu} \equiv 1$; у **серого тела** $a_{\nu} = \text{const} < 1$ не зависит от частоты и поляризации падающего излучения; у **белого тела** $a_{\nu} \equiv 0$ (полное отражение на всех частотах).

Поток энергии излучения Φ – энергия, переносимая через (падающая на) некоторую поверхность в единицу времени

$$\Phi = \frac{\delta W}{\delta t}.$$

Закон Кирхгофа – при любой температуре отношение спектральной плотности излучения тела $r_{\lambda,T}$ к его коэффициенту поглощения одинаково для всех тел и равно спектральной плотности излучения абсолютно черного тела

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^{\text{АЧТ}}.$$

Соотношение между $r_{\nu,T}$ и $r_{\lambda,T}$

$$r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}.$$

Закон смещения Вина

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

где $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ м · К – постоянная Вина; λ_m – длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения АЧТ.

Максимальная спектральная плотность излучения r_{λ_m} АЧТ соответствует длине волны λ_m

$$r_{\lambda_m}^{\text{АЧТ}} = CT^5,$$

где $C = 1,30 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³ · К⁵).

Формула Рэлея–Джинса – эмпирическая зависимость спектральной плотности излучения абсолютно черного тела от частоты и температуры для **низких частот** (много меньше частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности излучения)

$$r_{\nu,T}^{\text{АЧТ}} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Формула Планка для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела

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

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

Объемная плотность энергии $u = \delta W/\delta V$ равновесного теплового излучения (излучения, находящегося в равновесии с термостатом, например, в его полости) связана с энергетической светимостью (плотностью потока энергии излучения АЧТ)

$$R^{\text{АЧТ}} = \frac{c}{4} u.$$

Точно так же связаны спектральные плотности этих величин.

Энергия фотона

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

где h и \hbar – постоянная Планка; ν – частота; ω – угловая частота фотона.

Согласно принципу корпускулярно-волнового дуализма волна в то же время является и частицей, т. е. обладает импульсом.

Импульс фотона

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c},$$

где c – скорость света.

Явление **фотоэффекта** состоит в вырывании электронов из поверхности металла квантами света.

Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{в}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где ν – частота фотонов, падающих на поверхность металла и передающих свою энергию электронам; $A_{\text{в}}$ – работа выхода электронов из металла; m – масса электрона; v_{max} – максимальная скорость вылетающих фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта – минимальная частота (максимальная длина волны) света, освещающего поверхность металла, при которой еще возможен фотоэффект. Определяется из равенства $h\nu_{\text{к}} = A_{\text{в}}$.

Квантовый выход называется число выбитых электронов на один падающий фотон. Обычно он не превышает нескольких процентов.

Эффект Комптона – увеличение длины волны фотона при его рассеянии (столкновении) на свободном электроне

$$\Delta\lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\theta}{2} = \lambda_C (1 - \cos \theta),$$

где $\lambda_C = \frac{h}{mc} = 2,426$ пм – так называемая комптоновская длина волны электрона; m – масса электрона; θ – угол, на который фотон изменяет

направление своей скорости при столкновении со свободным электроном.

Сила давления света с потоком энергии Φ , падающего под углом α на площадку S с коэффициентом отражения ρ

$$F = \frac{\Phi}{c}(\rho + 1)S \cos\alpha.$$

Тормозное рентгеновское излучение – излучение, возникающее при резком торможении быстрых ($E \sim 1$ кэВ) электронов. В случае **рентгеновской трубки** наибольшая частота (наименьшая длина волны) рентгеновских фотонов (коротковолновая граница тормозного рентгеновского спектра) определяется из закона сохранения энергии

$$\nu_{\max} = \frac{eU}{h}, \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU},$$

где e – заряд электрона; U – разность потенциалов анод–катод рентгеновской трубки.

Водородоподобными атомами называются атомы, содержащие только один электрон. Обычно к ним относят атом водорода, однократно ионизированный атом гелия и двукратно ионизированный атом лития, а также их изотопы и так называемые **мезоатомы** – нестабильные образования, где вместо электрона присутствует μ -мезон.

Правило квантования в полуклассической теории Бора: орбитальный момент импульса электрона может принимать только значения, кратные постоянной Планка

$$mv_n r_n = n\hbar,$$

где m – масса электрона; v_n – скорость электрона; r_n – радиус орбиты электрона, $n = 1, 2, 3, \dots$ и т. д. – номер орбиты, квантовое число, определяющее состояние электрона в атоме.

Энергия электрона принимает дискретные значения и на n -й орбите равна (система СИ)

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2} \frac{Z^2}{n^2} = -\frac{me^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2} \frac{Z^2}{n^2},$$

где Z – зарядовое число (число протонов) ядра атома, ε_0 – электрическая постоянная.

Радиус n -й орбиты электрона

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi Z m e^2} n^2 = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{Z m e^2} n^2.$$

Энергия излученного фотона при переходе атома из дискретного состояния i в состояние k (значение главного квантового числа)

$$E = h\nu = E_i - E_k.$$

Частота излученного фотона

$$\nu = Z^2 R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{i^2} \right),$$

где R – постоянная Ридберга

$$R = \frac{m e^4}{8 h^3 \varepsilon_0^2} = 3,290 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Аналогичная формула для **длины волны** излученного фотона

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R' \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{i^2} \right),$$

где R' – постоянная Ридберга, используемая для определения длины волны, $R' = R/c = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Первый потенциал возбуждения атома – отношение энергии, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся на верхнем энергетическом уровне основного состояния для перехода на следующий уровень, к заряду электрона. Аналогично определяются **второй** и последующие потенциалы возбуждения, а также **ионизационный потенциал** атома, соответствующий полному отрыву электрона.

Спектр излучения атомарного водорода состоит из серий линий, которые определяются значением квантового числа n – уровнем, на который переходит возбужденный электрон:

- $n = 1$ – серия Лаймана, все линии расположены в ультрафиолетовом диапазоне;
- $n = 2$ – серия Бальмера, видимый диапазон;

- $n = 3$ – серия Пашена, инфракрасный диапазон;
- $n = 4$ – серия Брекета, инфракрасный диапазон;
- $n = 5$ – серия Пфунда, инфракрасный диапазон.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга учитывает дуализм свойств микрочастиц и связанные с ним ограничения на описание их состояния и возможности измерений. Микрочастица не может одновременно иметь и определенную (т. е. измеренную с произвольной точностью) координату (x, y, z) и определенную соответствующую («сопряженную») проекцию импульса (p_x, p_y, p_z). Соотношение Гейзенберга связывает **неопределенности** (погрешности измерений) компонент импульса и координат частицы

$$\begin{cases} \Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \\ \Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}, \\ \Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}. \end{cases}$$

Аналогичное соотношение существует для неопределенности **измеренного значения энергии** микрообъекта и **интервала времени**, в течение которого производилось измерение энергии

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Любой движущейся микрочастице, имеющей импульс p , можно сопоставить монохроматическую **волну де Бройля**, длина которой определяется из формулы

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

В соответствии с гипотезой де Бройля любая частица имеет волновые свойства, и ее состояние описывается комплексной **волновой функцией** ψ . Например, для движущейся вдоль оси x **свободной частицы** это бегущая волна

$$\psi(x, t) = Ae^{i\left(\frac{E}{\hbar}t - \frac{p}{\hbar}x\right)} = Ae^{i(\omega t - kx)},$$

где E и p – полная энергия и импульс частицы; ω и k – частота и волновое число соответствующей бегущей волны.

Физический смысл имеет квадрат модуля функции $|\psi(\vec{r}, t)|^2$, являющийся **плотностью вероятности** dw/dV обнаружения частицы в окрестности какой-либо точки пространства (x, y, z) в данный момент времени t :

$$dw = |\psi(x, y, z, t)|^2 dV.$$

Так как частица всегда находится в доступном для нее объеме, то интеграл от вероятности по этому объему тождественно равен единице – **условие нормировки** для волновой функции

$$\int_V dw = \int_V |\psi(x, y, z, t)|^2 dV \equiv 1.$$

В случае, когда положение частицы определяется одной координатой (одномерное движение), условие нормировки упрощается:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1.$$

Волновая функция определяется из **уравнение Шрёдингера**. В **стационарном состоянии** волновая функция не зависит от времени, частица с полной энергией E , не зависящей от времени, движется в стационарном потенциальном поле $U(\vec{r})$. Уравнение Шрёдингера для стационарного случая имеет вид

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(x, y, z) + [E - U(x, y, z)] \psi(x, y, z) = 0,$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

В **одномерном случае**, когда поле зависит только от одной координаты,

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + [E - U(x)] \psi(x) = 0.$$

«Потенциальной ямой» называют область пространства, в которой потенциальная энергия частицы меньше, чем в соседних областях. Если полная энергия частицы меньше глубины ямы, движение ее будет ограниченным (финитным). В бесконечно глубокой одномерной яме с идеально отражающими стенками (рис. 4.4) частица может двигаться вдоль оси x от точки $x = 0$ до точки $x = l$. В областях $x < 0$ и $x > l$ частица находиться не может (там $\psi(x) \equiv 0$). **Энергия частицы** в такой «яме» может принимать только строго определенные квантованные значения (дискретный спектр):

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \frac{\hbar^2}{2m},$$

где m – масса частицы, а n принимает значения 1, 2, 3, ... Таким образом, частица в потенциальной яме не может иметь нулевую энергию.

В случае движения частицы через низкий потенциальный барьер (ступенька, как на рис. 4.6) также можно использовать стационарное уравнение Шрёдингера, считая $E = \text{const}$ и нормируя амплитуду волновой функции на произвольную константу. При этом главным параметром $\psi(x) \sim e^{ikx}$ является волновое число k , зависящее от $E - U(x)$ в данной точке

$$k = \sqrt{\frac{2m(E - U)}{\hbar^2}}.$$

Важно, что даже в случае $E < U$, когда частица находится в области барьера и значения k – мнимые, плотность вероятности обнаружения частицы не равна нулю.

Коэффициент отражения R частицы от **низкого** потенциального барьера ($E > U$, рис. 4.6), т. е. отношение $|\psi|^2$ частицы, движущейся в области I справа налево (отразившейся от барьера), к квадрату волно-

вой функции частицы в области I, движущейся слева направо (падающей),

$$R = \left| \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right|^2.$$

Коэффициент прохождения D частицы через низкий потенциальный барьер, т. е. отношение $|\psi|^2$ частицы, прошедшей барьер (область II, рис. 4.6), к квадрату волновой функции частицы, падающей на барьер,

$$D = \frac{4k_1k_2}{(k_1 + k_2)^2}.$$

Коэффициент преломления n волн де Бройля на границе потенциального барьера (учитывая соотношение $k = 2\pi/\lambda$)

$$n = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{k_2}{k_1}.$$

Если полная энергия частицы E меньше «высоты» потенциального барьера U , то такой барьер называется **высоким** (рис. 4.5). Если частица движется слева направо, то с точки зрения классической теории она должна отразиться от такого барьера и снова оказаться в области I (у частицы недостаточно энергии, чтобы преодолеть барьер и оказаться в областях II и III). Квантовая теория предсказывает отличную от нуля вероятность обнаружения частицы в области III (прохождение частицей высокого барьера) – так называемый **туннельный эффект**.

Коэффициент прозрачности D высокого прямоугольного барьера конечной ширины l , т. е. отношение $|\psi|^2$ частицы в области III к квадрату волновой функции частицы, падающей на барьер, определяется приближенной формулой

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U - E)} \cdot l\right),$$

где D_0 – постоянный множитель порядка единицы.

Коэффициент отражения R частицы от высокого барьера просто выражается через коэффициент прозрачности

$$R = 1 - D.$$

Состояние электрона в атоме описывается волновой функцией ψ . Решение уравнения Шрёдингера для электрона в поле ядра **атома водорода** естественным образом дает выражение для дискретного спектра энергии электрона в атоме водорода (такое же, как и в теории Бора)

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8h^2\epsilon_0^2},$$

где m – масса электрона; ϵ_0 – электрическая постоянная (используется СИ); e – заряд электрона; h – постоянная Планка; $n = 1, 2, 3, \dots$ и т. д. – главное квантовое число, определяющее уровень энергии электрона.

Состояние каждого электрона в атоме водорода (и водородоподобных атомах) определяется **четырьмя квантовыми числами**: n , l , m_l , m_s :

n – **главное** квантовое число, определяет основные энергетические уровни, может принимать только натуральные значения: $1, 2, 3, 4, \dots$;

l – **орбитальное** квантовое число, определяет **орбитальный момент импульса** электрона в атоме, принимает значения $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$. Сам момент импульса электрона, точнее, его модуль, равен

$$L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)};$$

m_l – **орбитальное магнитное** квантовое число, определяет **проекцию орбитального момента импульса** электрона на заданное направление (направление внешнего магнитного поля), принимает значения $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$. Проекция момента импульса электрона на заданное направление z (на направление внешнего магнитного поля) может принимать значения

$$L_{lz} = \hbar m_l;$$

s – **спиновое** квантовое число, определяет **собственный момент импульса** электрона – **спин**, имеет значение $\frac{1}{2}$, модуль спинового момента импульса равен

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)};$$

m_s – **магнитное спиновое** квантовое число, определяет **проекцию спина** электрона на направление внешнего магнитного поля. Может принимать только два значения – $m_s = \pm\frac{1}{2}$, как и сама проекция спина

$$L_{sz} = \hbar m_s.$$

В **многоэлектронных атомах** распределение электронов по состояниям подчиняется **принципу Паули**, согласно которому каждый электрон имеет свой определенный набор квантовых чисел (n, l, m_l, m_s), т. е. любые два электрона должны отличаться хотя бы одним квантовым числом. Энергия электронов с определенным числом n зависит и от остальных квантовых чисел, т. е. энергетические уровни **расщепляются**, хотя и не очень сильно. На уровне n может находиться $2n^2$ электронов. Для удобства оболочкам присваиваются буквенные обозначения:

n	1	2	3	4	5
Обозначение	K	L	M	N	O

В каждой оболочке электроны распределяются по **подоболочкам**, определяемым квантовым числом l . Соответствующие состояния электронов обозначаются малыми буквами латинского алфавита:

l	1	2	3	4	5
Обозначение	s	p	d	f	g

Символ подоболочки складывается из цифрового обозначения главного квантового числа n и буквенного обозначения квантового числа l – $1s, 2p, 4d$ и т. д. Полная электронная конфигурация атома без

учета спина включает числа электронов на каждой подоболочке, например, углерод $C - 1s^2 2s^2 2p^2$, бром $Br - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^5$.

Излучение фотона атомом совершается при переходе электрона из возбужденного состояния в основное (или в состояние с меньшей энергией). Однако фотон имеет собственный спин, равный единице, поэтому, исходя из закона сохранения момента импульса, суммарный момент импульса атома при излучении фотона должен изменяться, что выражается в изменении на единицу квантового числа l , отвечающего за орбитальный момент импульса. Данное обстоятельство выражается **правилом отбора**: изменение орбитального квантового числа при излучении фотона атомом подчиняется условию

$$\Delta l = \pm 1.$$

Удельная электропроводность полупроводника

$$\sigma = e(nb_n + pb_p),$$

где e – заряд электрона; b_n и b_p – подвижности электронов и дырок соответственно; n и p – концентрации электронов и дырок соответственно. У **собственного полупроводника** концентрации электронов и дырок равны. У **примесного полупроводника** собственная проводимость при обычных температурах много меньше примесной.

Электропроводность собственного полупроводника зависит от температуры:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Примеры решения задач

Пример 4.1. Имеются две полости 1 и 2 с малыми отверстиями одинаковых радиусов 1,0 см и абсолютно отражающими поверхностями. Отверстиями полости обращены друг к другу, расстояние между отверстиями 50 см (рис. 4.1). В полости 1 поддерживается температура 2000 °С. Определить равновесную температуру в полости 2.

Решение

При равновесии полость 2 через отверстие от излучателя 1 получает столько же энергии в единицу времени, сколько излучает. Ввиду относительной малости отверстий их излучение можно считать равновесным, т. е. подчиняющимся закону Стефана–Больцмана (коэффициент поглощения малого отверстия близок к единице, т. е. отверстие можно считать абсолютно черным телом).

Кроме того, поскольку расстояние между отверстиями много больше их размеров, поток 1→2 можно рассматривать как поток от точечного источника.

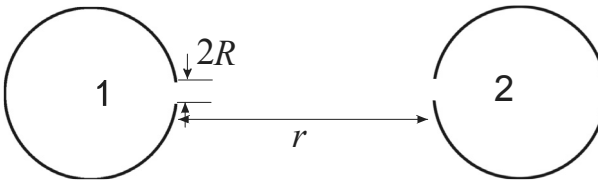


Рис. 4.1

Энергетический поток, испускаемый полостью 2, равен

$$\Phi_2 = \sigma T_2^4 S = \sigma T_2^4 \pi R^2.$$

Аналогичный поток, испускаемый полостью 1, равен

$$\Phi = \sigma T_1^4 S = \sigma T_1^4 \pi R^2.$$

В отверстие 2 попадает лишь его часть. Обозначив эффективную силу света (энергетический поток в единичный телесный угол) источника 1 через I , получим поток, падающий на отверстие 2:

$$\Phi_1 = \frac{I}{r^2} S = \frac{I}{r^2} \pi R^2.$$

Здесь r – расстояние между отверстиями; R – радиусы отверстий. Величину I можно определить как поток излучения из отверстия 1, деленный на π (для реального точечного источника этот поток надо делить на 2π , но в нашем случае эффективная сила света отверстия в данном направлении пропорциональна площади видимой проекции

отверстия, т. е. косинусу угла выхода излучения. Так как абсолютно черное тело – косинусный излучатель, то для него справедлива формула $\Phi = \pi I$). Так как $\Phi_1 = \Phi_2$, то

$$\frac{\Phi}{\pi r^2} \pi R^2 = \frac{\sigma T_1^4 \pi R^2}{\pi r^2} \pi R^2 = \sigma T_2^4 \pi R^2,$$

$$\frac{\sigma T_1^4 \pi R^2}{\pi r^2} = \sigma T_2^4.$$

Отсюда

$$T_2 = \sqrt{\frac{R}{r}} T_1 \approx 0,141 \cdot 2273 \approx 318 \text{ К} = 45 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Пример 4.2. Определить мощность солнечного излучения, падающего на квадратный метр земной поверхности перпендикулярно к ней и имеющего длины волн в интервале $\Delta\lambda = 10 \text{ нм}$ вблизи максимума спектральной плотности, соответствующего температуре поверхности Солнца 6000 К. Солнечную постоянную C принять равной 1400 Вт/м^2 (поглощение в атмосфере не учитывать).

Решение

Исходим из формулы Планка для спектральной плотности теплового излучения

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Для того чтобы использовать данные условия, требуется сменить переменную ν на λ , учитывая, что переход от интервала $d\nu$ к $d\lambda$ также внесет в спектральную функцию изменения

$$d\nu = d\left(\frac{c}{\lambda}\right) = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda.$$

Смена знака здесь просто обусловлена тем, что эквивалентные изменения частоты и длины волны происходят в разных направлениях.

Таким образом, спектральная плотность равновесного излучения имеет следующее распределение по длинам волн:

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

Нас интересует доля общей мощности излучения (общая мощность задана постоянной C), приходящаяся на выделенный интервал длин волн, которую можно получить, проинтегрировав $r_{\lambda,T}$ по интервалу $\Delta\lambda$. В связи с отсутствием поглощения света распределение энергии по длинам волн не изменяется на всём расстоянии от Солнца до Земли. Так как интервал мал, а значение функции вблизи максимума (соответствующее значение λ_m) почти постоянное, то интегрирование можно заменить простым перемножением. Значение λ_m легко найти из закона Вина, являющегося одним из следствий распределения Планка:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{6000} \approx 480 \text{ нм.}$$

Само значение спектральной плотности можно найти из формулы Планка, подставив в него λ_m :

$$r_{\lambda_m,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\left(\frac{b}{T}\right)^5} \frac{1}{e^{hc/bk} - 1} = \frac{2\pi c^2 h}{b^5} \frac{1}{e^{hc/bk} - 1} T^5.$$

Мощность излучения, приходящаяся на заданный интервал длин волн (учтем, что интеграл в знаменателе дает энергетическую светимость)

$$P_{\Delta\lambda} = C \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_{\lambda,T} d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda} \approx C \frac{r_{\lambda_m} \Delta\lambda}{\sigma T^4} = C \frac{2\pi c^2 h T^5}{b^5 \sigma T^4} \frac{\Delta\lambda}{e^{hc/bk} - 1} \approx 19 \text{ Вт/м}^2.$$

Пример 4.3. При падении ультрафиолетового излучения с длиной волны 200 нм на поверхность некоторого металла величина задерживающего потенциала для фототока составляет 1,5 В. Для излучения с длиной волны 150 нм эта величина равна 3,6 В. Определить по этим данным постоянную Планка и работу выхода для данного металла.

Решение

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

видно, что фототок прекращается, если работа задерживающего поля компенсирует максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов

$$eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A.$$

Записав это соотношение для двух длин волн падающего на поверхность металла излучения, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} eU_{31} = h\frac{c}{\lambda_1} - A, \\ eU_{32} = h\frac{c}{\lambda_2} - A. \end{cases}$$

Отсюда постоянная Планка

$$h = \frac{e(U_{32} - U_{31})}{c\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}(3,6 - 1,5)}{3 \cdot 10^8\left(\frac{1}{1,5 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{2 \cdot 10^{-7}}\right)} \approx 6,7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Работу выхода можно получить из любого уравнения системы, например, из первого:

$$A = h\frac{c}{\lambda_1} - eU_{31} \approx 4,7 \text{ эВ}.$$

Пример 4.4. Космический аппарат массой 5000 кг имеет полностью отражающий солнечный парус площадью 1 км^2 . За какое время этот аппарат под воздействием солнечного излучения может приобрести дополнительную скорость 5 км/с, находясь на орбите Земли? Солнечную постоянную S принять равной 1400 Вт/м^2 .

Решение

Сила давления излучения на парус

$$F = PS \cos \alpha = \frac{C}{c} (\rho + 1) S \cos \alpha ,$$

где ρ – коэффициент отражения; α – угол падения светового потока на парус. В нашем случае $\rho = 1$, наиболее благоприятный угол падения $\alpha = 0$. Таким образом,

$$F = \frac{2CS}{c}.$$

Приобретаемую аппаратом скорость выражаем, считая движение равноускоренным:

$$v = a \Delta t = \frac{F}{m} \Delta t,$$

отсюда

$$\Delta t = \frac{mv}{F} = \frac{mvc}{2CS} = \frac{5 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1400 \cdot 10^6} \approx 2,7 \cdot 10^6 \text{ с} = 31 \text{ сут.}$$

Пример 4.5. Определить скорость электронов, падающих на антикатод рентгеновской трубки, если длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра равна 4,0 пм.

Решение

Длина волны фотонов коротковолновой границы спектра тормозного излучения определяется условием полного перехода кинетической энергии падающего на антикатод электрона в энергию одного фотона

$$E_{\text{кин}} = h\nu_{\text{гр}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{гр}}}.$$

Согласно условию эта энергия составляет

$$6,62 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{-12}} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \approx 0,3 \text{ МэВ}.$$

Поскольку полная энергия покоящегося электрона $m_0c^2 = 0,51 \text{ МэВ}$, электроны являются существенно релятивистскими, и необходимо использовать релятивистское выражение для кинетической энергии электрона

$$E_{\text{кин}} = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = h \frac{c}{\lambda_{\text{гр}}}.$$

Отсюда

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0c\lambda_{\text{гр}}}{m_0c\lambda_{\text{гр}} + h} \right)^2} \approx 0,78c.$$

Пример 4.6. Используя соотношение неопределенностей, показать, что электроны, образующиеся при β -распаде ядер, не могли находиться в них до начала процесса.

Решение

Считая размер ядра порядка $a = 10^{-15} \text{ м}$, имеем неопределенность в импульсе электрона внутри ядра

$$\Delta p \sim \frac{\hbar}{a} \approx 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}.$$

Поскольку средний импульс при финитном движении равен нулю, средняя абсолютная величина $p_{\text{ср}} \sim \Delta p$. Соответствующая неопределенность кинетической энергии электрона

$$(E_{\text{кин}})_{\text{ср}} \sim \frac{(p_{\text{ср}})^2}{2m} \sim \frac{(\Delta p)^2}{2m} \approx \frac{(10^{-19})^2}{2 \cdot 10^{-30}} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ эВ}.$$

Такого же порядка будут неопределенности его потенциальной и полной энергии.

Но кинетическая энергия такой величины (ее среднее значение, очевидно, можно оценить полученной выше неопределенностью) означает ультррелятивистское состояние электрона, т. е.

$$E_{\text{кин}} \approx mc^2 \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ эВ} = 60\,000 m_0,$$

где $m_0 = 0,5 \text{ МэВ}$ – масса покоя электрона. Таким образом, в массе ядра должна присутствовать электронная часть, превосходящая (для небольших ядер) часть нуклонную, чего на самом деле не наблюдается.

Пример 4.7. Электрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 6 \AA в состоянии с минимальной энергией. Используя соотношение неопределенностей, оценить его силу давления на стенки и работу, необходимую для уменьшения вдвое ширины ямы.

Решение

Используем простую механическую модель движения электрона с постоянной абсолютной величиной импульса p . Эту величину можно оценить с помощью соотношения неопределенностей, считая $\Delta p \approx p$ (изменяется от $-p$ до p), а $\Delta x \approx a$ (ширина ямы):

$$p \approx \frac{\hbar}{a}.$$

Количество ударов в стенку за время Δt равно

$$N = \frac{\Delta t}{2a/v} = \frac{\Delta t}{2am/p} = \frac{p\Delta t}{2am},$$

а сила, действующая на стенку, по второму закону Ньютона равна

$$F = \frac{N \cdot 2p}{\Delta t} = \frac{p^2}{ma} = \frac{\hbar^2}{ma^3} = \frac{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}{9,1 \cdot 10^{-31} (6 \cdot 10^{-10})^3} \approx 5,6 \cdot 10^{-11} \text{ Н}.$$

Работа, совершенная против этой силы на пути $a/2$

$$A = Fa/2 \approx 1,7 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = 0,11 \text{ эВ}.$$

Пример 4.8. Исходя из волновых представлений определить средние угловые отклонения частиц параллельных пучков после прохождения щели шириной $a = 0,01$ мм для фотонов и электронов с энергией $E = 4$ эВ.

Решение

Согласно волновым представлениям длины волн нерелятивистских частиц (в данном случае электронов) определяются соотношением

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}},$$

а для релятивистских частиц с нулевой массой покоя (фотонов)

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E}.$$

Угловые отклонения пучков, рассматриваемые как дифракционные (исходя из формулы дифракции на щели $a \sin \varphi = m\lambda$ и учитывая малость угла), зависят от этих длин волн и ширины щели:

$$\varphi_e = \frac{\lambda}{a} = \frac{h}{a\sqrt{2mE}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{-5} \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx$$

$$\approx 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,35^\circ,$$

$$\varphi_\phi = \frac{hc}{aE} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-5} \cdot 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ рад} = 1,8^\circ.$$

Пример 4.9. *K*- и *L*-оболочки атома заполнены полностью, а *M*-оболочка – наполовину. Что это за атом? Определить его электронную конфигурацию.

Решение

Полностью заполненная *M*-оболочка имеет конфигурацию $3s^2 3p^6 3d^{10}$ и 18 электронов. Следовательно, ее конфигурация в данном атоме $3s^2 3p^6 3d$ (уровни *d* выше по энергии, чем *s* и *p*). Кроме того, после заполнения *s*- и *p*-уровней этой оболочки (атом Ag) в атомах К и Са запол-

няются уровни $4s$, лежащие ниже уровней $3d$. Таким образом, мы имеем дело с атомом скандия, конфигурация которого $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d 4s^2$.

Пример 4.10. Красная граница внутреннего фотоэффекта для чистого германия соответствует $\lambda_0 = 1,7$ мкм. Найти температурный коэффициент сопротивления этого полупроводника при $T = 300$ К.

Решение

По заданной красной границе фотоэффекта определим ширину запрещенной зоны

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,7 \cdot 10^{-6}} \approx 1,17 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,73 \text{ эВ}.$$

Проводимость германия пропорциональна концентрации носителей, которая определяется температурой. Поскольку полупроводник собственный, уровень Ферми лежит посередине запрещенной зоны, так что для дырок и электронов

$$\sigma \sim n \sim e \frac{\Delta E}{2kT}.$$

Соответственно, удельное сопротивление полупроводника

$$\rho \sim e \frac{\Delta E}{2kT},$$

а температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = - \frac{\Delta E}{2kT^2} = - \frac{0,73 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300^2} \approx -0,047 \text{ К}^{-1}.$$

Занятие 15. Тепловое излучение

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

15.2. Найти мощность, излучаемую абсолютно черным шаром радиусом 10 см , который находится в комнате при температуре $20 \text{ }^\circ\text{С}$.

15.3. Оценить мощность энергетических потерь за счет теплового излучения человеческим телом за сутки в приближении абсолютно черного тела. Температура окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ориентировочная площадь поверхности человека средней комплекции 1 м^2 .

15.4. При работе электрической лампы накаливания вольфрамовый волосок нагрелся, в результате чего длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения, изменилась от $1,4$ до $1,1\text{ мкм}$. Во сколько раз увеличилась при этом максимальная спектральная плотность излучения, если волосок принять за абсолютно черное тело? Насколько изменилась при этом температура волоска?

15.5. Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности излучения переместится от 700 до 600 нм ?

15.6. Температура нити обычной лампы накаливания 2700 К . Определить длину волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения. Определить аналогичный параметр для галогенной лампы, температура нити которой 3200 К .

15.7. Железный шар диаметром 10 см , нагретый до температуры $1227\text{ }^{\circ}\text{C}$, остывает на открытом воздухе. Через какое время его температура понизится до 1000 К ? При расчете принять, что отношение энергетических светимостей железа и абсолютно черного тела $0,5$. Теплопроводностью воздуха пренебречь. Удельная теплоемкость железа $460\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

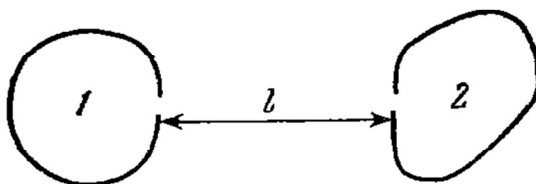


Рис. 4.2

15.8. Имеются две полости с малыми отверстиями одинакового диаметра $d = 1,0\text{ см}$ и абсолютно отражающими наружными поверхностями. Расстояние между отверстиями $l = 10\text{ см}$. В полости поддерживается постоянная температура 1700 К . Вычислить установившуюся температуру в полости 2. *Указание:* иметь в виду, что абсолютно черное тело является косинусным излучателем.

15.9. С помощью формулы Планка найти мощность излучения единицы поверхности абсолютно черного тела, приходящегося на узкий интервал длин волн $\Delta\lambda = 1,0$ нм вблизи максимума спектральной плотности излучения, при температуре тела $T = 2500$ К.

Задачи для самостоятельного решения

Д.15.1. Определить температуру T , при которой энергетическая светимость черного тела равна 10 кВт/м².

Д.15.2. Определить энергию W , излучаемую за время $t = 1$ мин из смотрового окошка плавильной печи площадью $S = 8$ см², если ее температура $T = 1,2$ кК.

Д.15.3. Максимум спектральной плотности энергетической светимости яркой звезды Арктур приходится на длину волны $\lambda_m = 580$ нм. Считая, что звезда излучает как черное тело, определить температуру поверхности звезды.

Д.15.4. Вследствие изменения температуры черного тела максимум спектральной плотности излучения сместился с $\lambda_1 = 2,4$ мкм на $\lambda_2 = 0,8$ мкм. Как и во сколько раз изменились энергетическая светимость тела и максимальная спектральная плотность излучения?

Занятие 16. Квантовые свойства излучения

16.1. Во сколько раз энергия фотона ($\lambda = 550$ нм) больше средней кинетической энергии поступательного движения молекулы кислорода при комнатной температуре (17 °С)?

16.2. Оценить, сколько фотонов испускает лазерная указка ($\lambda = 690$ нм, мощность 1 мВт) за 1 с.

16.3. Какова максимальная скорость электронов, вылетающих с поверхности молибдена при освещении его лучами с длиной волны 200 нм? Работа выхода для молибдена $4,2$ эВ.

16.4. Красная граница фотоэффекта рубидия 810 нм. Какое задерживающее напряжение нужно приложить к фотоэлементу, чтобы ни одному из электронов, испускаемых рубидием под действием ультрафиолетовых лучей с длиной волны 100 нм, не удалось преодолеть задерживающее поле?

16.5. На графике представлены зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты. Какой из материалов фотокатода имеет меньшую работу выхода?

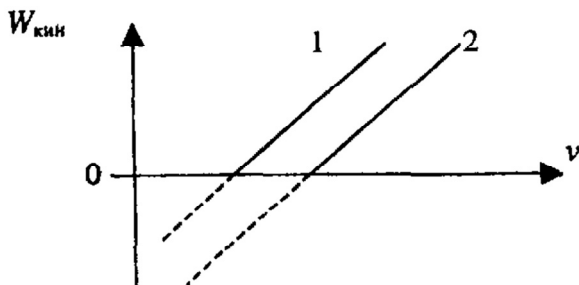


Рис. 4.3

16.6. Найти силу, действующую на космический корабль, оборудованный солнечным парусом, и сообщаемое ему ускорение. Масса корабля 1000 кг, площадь паруса $100 \times 100 \text{ м}^2$, коэффициент отражения равен единице. Солнечная постоянная на орбите Земли $1,4 \text{ кВт/м}^2$.

16.7. Рентгеновская трубка работает при напряжении 30 кВ. Найти максимальную скорость электрона и наименьшее значение длины волны тормозного рентгеновского излучения.

16.8. Вычислить комптоновское смещение и относительное изменение длины волны для видимого света ($\lambda = 500 \text{ нм}$) и γ -лучей ($\lambda = 5 \text{ пм}$) при рассеянии на первоначально покоившихся свободных электронах. Угол рассеяния 90° .

16.9. Фотон с энергией $0,75 \text{ МэВ}$ рассеялся на свободном электроне под углом 60° . Найти энергию рассеянного фотона, кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. Кинетической энергией электрона до соударения пренебречь.

Задачи для самостоятельного решения

Д16.1. Для прекращения фотоэффекта, вызванного облучением ультрафиолетовым светом платиновой пластинки, нужно приложить задерживающую разность потенциалов $U_1 = 3,7 \text{ В}$. Если платиновую пластинку заменить другой пластинкой, то задерживающую разность

потенциалов придется увеличить до 6 В. Определить работу A выхода электронов с поверхности этой пластинки.

Д16.2. Поток энергии Φ_e , излучаемый электрической лампой, равен 600 Вт. На расстоянии $r = 1$ м от лампы перпендикулярно падающим лучам расположено круглое плоское зеркальце диаметром $d = 2$ см. Принимая, что излучение лампы одинаково во всех направлениях и что зеркальце полностью отражает падающий на него свет, определить силу F светового давления на зеркальце.

Д16.3. Определить энергию, массу и импульс фотона, которому соответствует длина волны $\lambda = 380$ нм (фиолетовая граница видимого спектра).

Д16.4. Определить угол θ рассеяния фотона, испытавшего соударение со свободным электроном, если изменение длины волны $\Delta\lambda$ при рассеянии равно 3,62 пм.

Занятие 17. Волны де Бройля. Соотношения неопределенностей

17.1. Скорость тепловых нейтронов, средняя кинетическая энергия которых близка к средней энергии атомов газа при комнатной температуре, равна 2,5 км/с. Найти длину волны де Бройля для таких нейтронов.

17.2. На грань кристалла никеля под углом 64° к поверхности грани падает параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Принять расстояние между соответствующими плоскостями, параллельными грани кристалла, $d = 200$ пм. Пользуясь уравнением Вульфа–Брегга, найти скорость электронов, если они испытывают интерференционное отражение первого порядка.

17.3. Поток летящих параллельно друг другу электронов, имеющих скорость 10^5 м/с, проходит через щель шириной $b = 0,01$ мм. Найти ширину Δx центрального дифракционного максимума, наблюдаемого на экране, отстоящем от щели на расстояние 1 м. Сравнить Δx с шириной щели b .

17.4. Вычислить длину волны де Бройля для протона с кинетической энергией 100 эВ.

17.5. Неопределенность скорости электронов, движущихся вдоль оси абсцисс, составляет $\Delta v = 10^2$ м/с. Какова при этом неопределенность координаты x , определяющей местоположение электрона?

17.6. Наименьшая неточность, с которой можно найти координату электрона в атоме водорода, порядка 10^{-10} м. Найти неопределенность средней кинетической энергии электрона в невозбужденном атоме водорода.

17.7. Длительность возбужденного состояния атома водорода составляет примерно $\Delta t = 10^{-7}$ с. Какова неопределенность энергии в этом состоянии? Каково естественное уширение спектральной линии, если ее длина волны 656,3 нм?

17.8. Считая, что погрешность определения координаты электрона в невозбужденном атоме водорода того же порядка, что и диаметр самого атома (10^{-10} м), оценить длину волны электрона (считая, что скорость электрона того же порядка, что и ее погрешность).

Задачи для самостоятельного решения

Д17.1. Электрон движется со скоростью 200 Мм/с. Определить длину волны де Бройля, считая электрон релятивистским.

Д17.2. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти электрон, чтобы длина волны де Бройля была равна 0,1 нм?

Д17.3. Электрон с кинетической энергией $W_k = 15$ эВ находится в металлической пылинке диаметром $d = 1$ мкм. Оценить относительную неточность Δv , с которой может быть определена скорость электрона.

Д17.4. Используя соотношение неопределенности $\Delta E \Delta t \geq \hbar$, оценить ширину Γ энергетического уровня в атоме водорода, находящемся: 1) в основном состоянии; 2) в возбужденном состоянии (время жизни атома в возбужденном состоянии равно 10^{-8} с).

Занятие 18. Простейшие задачи квантовой механики

18.1. Электрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 10^{-9} м с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти его наименьшее значение энергии, разность энергии

между первым и вторым уровнями, значение квантового числа, при котором разность энергий соседних уровней равна 1 % от энергии, которой обладает электрон на нижнем уровне.

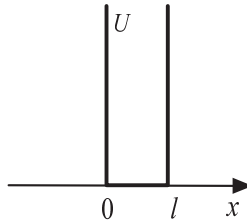


Рис. 4.4

18.2. Частица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками ($0 < x < l$). Найти вероятность пребывания частицы в области $l/3 < x < 2l/3$.

18.3. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Ширина ямы l такова, что энергетические уровни расположены весьма густо. Найти плотность уровней dN/dE , т. е. их количество на единичный интервал энергии, в зависимости от E . Вычислить dN/dE для $E = 1$ эВ, если $l = 1$ см.

18.4. Для электрона с энергией $E = 4$ эВ найти вероятность D прохождения потенциального барьера, ширина которого 1 нм и высота $U = 6$ эВ, если барьер имеет прямоугольную форму.

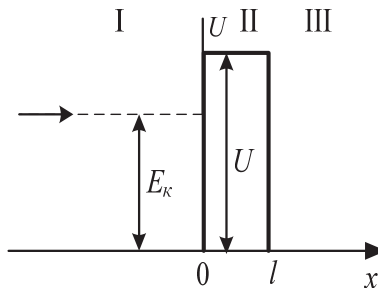


Рис. 4.5

18.5. Частицы с массой m и энергией E движутся слева на потенциальный барьер (рис. 4.6). Найти:

- а) коэффициент отражения R этого барьера при $E = 6$ эВ, $U_0 = 4$ эВ;
 б) эффективную глубину проникновения частиц в область $x > 0$ при $E < U_0$, т. е. расстояние от границы барьера до точки, где плотность вероятности нахождения частицы уменьшается в e раз. Вычислить эту величину для электрона с энергией $E = 4$ эВ и высотой барьера $U_0 = 6$ эВ.

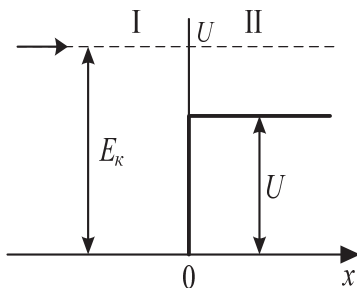


Рис. 4.6

18.6. Протон и электрон прошли одинаковое ускоряющее напряжение 10 В. Во сколько раз отличаются коэффициенты прозрачности барьера высотой 20 эВ и шириной 0,1 пм для протона и электрона?

Задачи для самостоятельного решения

Д18.1. Электрон находится в потенциальной яме шириной $l = 0,5$ нм. Определить наименьшую разность ΔE энергетических уровней электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

Д18.2. Частица в потенциальной яме шириной l находится в возбужденном состоянии ($n = 2$). Определить, в каких точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности $|\psi_2(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна.

Д18.3. В одномерной потенциальной яме шириной l находится электрон. Вычислить вероятность w нахождения электрона на первом энергетическом уровне в интервале $l/4$, равноудаленном от стенок ямы.

Д18.4. Ширина d прямоугольного потенциального барьера равна 0,2 нм. Разность энергий $U - E = 1$ эВ. Во сколько раз изменится вероятность w прохождения электрона через барьер, если разность энергий возрастет в $n = 10$ раз?

Занятие 19. Водородоподобные атомы. Квантовые числа атомов

19.1 Во сколько раз увеличится радиус орбиты электрона у атома водорода, находящегося в основном состоянии, при возбуждении его фотоном энергией 12,09 эВ?

19.2. Определить энергию фотона, соответствующего наименьшей длине волны, в ультрафиолетовой серии водорода.

19.3. Какую работу нужно совершить, чтобы удалить электрон со второй орбиты атома водорода за пределы притяжения его ядром?

19.4. Покоящийся ион He^+ испустил фотон, соответствующий головной линии серии Лаймана. Этот фотон вырвал фотоэлектрон из покоящегося атома водорода, который находился в основном состоянии. Найти скорость фотоэлектрона.

19.5. Определить, возможны ли излучательные или поглощательные переходы: $1s-2p$; $1s-3p$; $1s-3s$; $1s-3d$; $3d-2p$; $2p-4f$; $2s-2p$. Определить энергии и длины волн для разрешенных излучательных переходов в атоме водорода.

19.6. Заполненная электронная оболочка характеризуется квантовым числом $n = 3$. Указать число электронов на этой оболочке, которые имеют одинаковыми следующие квантовые числа: 1) $m_s = +1/2$; 2) $m_l = +1$; 3) $m_l = -2$; 4) $m_s = -1/2$ и $m_l = 0$; 5) $m_s = +1/2$ и $l = 2$.

19.7. В атоме K -, L - и M -оболочки заполнены полностью. Определите: а) общее число электронов в атоме; б) число s -, p - и d -электронов; в) сколько p -электронов имеют квантовое число $m_l = 0$.

Задачи для самостоятельного решения

Д19.1. Какое максимальное число s -, p - и d -электронов может находиться в каждой из K -, L - и M -оболочек атома? Оболочки полностью заполнены.

Д19.2. Используя принцип Паули, указать, какое максимальное число N_{\max} электронов в атоме могут иметь одинаковыми следующие квантовые числа: 1) n, l, m_l, m_s ; 2) n, l, m_l ; 3) n, l ; 4) n .

Д19.3. Переход электрона в атоме водорода с n -й на k -ю орбиту ($k = 1$) сопровождается излучением фотона с длиной волны $\lambda = 102,6$ нм. Найти радиус n -й орбиты.

Д19.4. Атом водорода переведен из нормального состояния в возбужденное, характеризуемое главным квантовым числом 2. Найти энергию, необходимую для перевода атома водорода в указанное возбужденное состояние.

Занятие 20. Электропроводность металлов и полупроводников

20.1. В серебре объемом 1 м^3 находится приблизительно $5,8 \cdot 10^{28}$ электронов проводимости. Найти среднюю скорость дрейфа электронов при наложении напряженности электрического поля вдоль проводника $E = 1$ В/м. Удельное сопротивление серебра $1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

20.2. Нарисовать схематически зависимость логарифма проводимости от $1/T$ для кремния ($\Delta E = 1,08$ эВ) и германия ($\Delta E = 0,66$ эВ). Ответ обосновать.

20.3. Нарисовать схематически зависимость удельного сопротивления от температуры для никеля ($\alpha = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$) и нихрома ($\alpha = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$). Ответ обосновать.

20.4. Германиевый образец нагревают от 0 до 17°C . Определить, во сколько раз уменьшается его удельное сопротивление, если ширина запрещенной зоны $0,72$ эВ.

20.5. Определить концентрацию свободных электронов в металле при температуре $T = 0$ К, если энергия Ферми равна $E_f = 1$ эВ.

20.6. Вычислить энергию Ферми E_f свободных электронов в кристалле меди при температуре $T = 0$ К. Принять, что на каждый атом меди приходится по одному свободному электрону. Плотность меди $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

20.7. Концентрация свободных носителей заряда в кремнии $n = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,15 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а дырок

$\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Определить сопротивление кремниевого стержня длиной 5 см и площадью поперечного сечения 2 мм^2 .

20.8. Во сколько раз концентрация носителей тока в чистом сплаве антимонида индия InSb при температуре 400 К больше концентрации при 300 К? Ширина запрещенной зоны для InSb равна 0,18 эВ.

Задачи для самостоятельного решения

Д20.1. Определить число свободных электронов, которое приходится на один атом натрия при температуре $T = 0 \text{ К}$. Уровень Ферми ε_f для натрия равен 3,12 эВ. Плотность ρ натрия равна 970 кг/м^3 .

Д20.2. Определить максимальную скорость электронов в металле при $T = 0 \text{ К}$, если уровень Ферми $\varepsilon_f = 5 \text{ эВ}$.

Д20.3. Кремниевый образец нагревается от температуры $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$ до $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{С}$. Как и во сколько раз изменится его электропроводность? Ширина запрещенной зоны кремния 1,1 эВ.

Д20.4. Удельное сопротивление кремния с примесью $\rho = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, холловская постоянная равна $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Определить концентрацию дырок p и их подвижность μ_p . Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

5. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Основные формулы

Ядро атома состоит из **нуклонов** – протонов и нейтронов. Масса ядра при этом меньше, чем суммарная масса составляющих его нуклонов. Разность суммарной массы нуклонов и массы ядра атома называется **дефектом массы**

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{A}{Z}m_{\text{я}},$$

где Z – **зарядовое число** ядра (число протонов, порядковый номер в таблице Менделеева); A – **массовое число** (число нуклонов) атома (ядра); m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона; $\frac{A}{Z}m_{\text{я}}$ – масса ядра. Удобнее пользоваться не массой ядра, а массой атома, при этом учет массы электронов, входящих в атом, происходит автоматически, с использованием вместо массы протона массы атома водорода (количество протонов в ядре равно количеству электронов)

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - \frac{A}{Z}m_a,$$

где m_{H} – масса атома водорода ${}^1_1\text{H}$, $\frac{A}{Z}m_a$ – масса атома.

Примечание. Для расчетов нельзя пользоваться массой атома, взятой из таблицы Менделеева (в ней приведены средние значения по нескольким изотопам, встречающимся в природе), необходимо использовать точные значения масс изотопов, приведенные в таблице (см. приложение).

Энергия связи ядра вычисляется по формуле Эйнштейна

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2,$$

где c – скорость света.

Примечание. Расчет дефекта массы удобнее производить в атомных единицах массы с последующим переводом в килограммы. Энергию связи, полученную в джоулях, имеет смысл выражать в электрон-вольтах.

Закон радиоактивного распада

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

где N_0 – число радиоактивных атомов в начальный момент времени; N – число оставшихся атомов к моменту времени t ; λ – **постоянная распада**.

Период полураспада $T_{1/2}$ – время, в течение которого число атомов в результате распада уменьшается в 2 раза:

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

Суммарная продолжительность жизни dN ядер, распадающихся за время dt в момент t , равна

$$t |dN| = \lambda N t dt.$$

Проинтегрировав это выражение по всему времени распада начального количества ядер N_0 (т. е. от 0 до ∞) и разделив на начальное количество ядер N_0 , получим **среднее время жизни τ** радиоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{\lambda}.$$

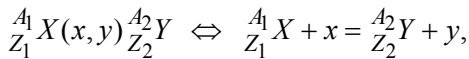
Другими словами, это время, за которое первоначальное количество ядер уменьшается в e раз.

Активность A образца – число распадов ядер в единицу времени:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N,$$

т. е. активность пропорциональна числу оставшихся ядер и постоянной распада.

Ядерные реакции часто записываются в сокращенной форме:

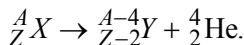


где ${}_{Z_1}^{A_1}X$ – исходное ядро; x – реагирующая частица, ${}_{Z_2}^{A_2}Y$ – дочернее ядро; y – ядро или частица, полученные в результате реакции; Z – заряд ядра; A – массовое число ядра (число протонов и нейтронов в ядре).

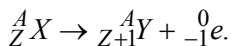
Во всех ядерных реакциях и процессах выполняются **законы сохранения**: **закон сохранения заряда** $\sum Z_i = \text{const}$; **закон сохранения массового числа** $\sum A_i = \text{const}$. При этом легкие частицы (электрон, позитрон) не оказывают влияния на значение массового числа.

Радиоактивный распад происходит в соответствии с **правилами смещения**, позволяющими установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра. Правила смещения являются следствием законов сохранения заряда и массового числа.

При **α -распаде** материнское ядро испускает α -частицу (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$), в результате чего массовое число дочернего ядра уменьшается на 4, а его заряд также уменьшается на 2

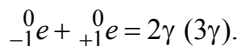


При **β -распаде** материнское ядро испускает электрон, в результате чего массовое число дочернего ядра не изменяется, а его заряд увеличивается на единицу:



В последних уравнениях A_ZX – материнское ядро; Y – символ дочернего ядра; ${}^4_2\text{He}$ – ядро гелия (α -частица); ${}^0_{-1}e$ – символическое обозначение электрона (заряд его равен -1 , а массовое число – нулю).

При столкновении позитрона с электроном происходит их **аннигиляция**:



В этом процессе электрон-позитронная пара превращается в два или три γ -кванта. При этом выполняются **законы сохранения энергии и импульса**. Так как спин фотона целочисленный, а электрона и позитрона – половинный, то результат аннигиляции зависит от ориентации спинов электрона и позитрона: при противоположной ориентации возникает два γ -кванта, при одинаковой – три.

При аннигиляции **полная энергия**

$$E = m_0c^2 + E_k$$

электрона и позитрона (E_k – кинетическая энергия) переходит в энергию γ -квантов:

$$E_e + E_{\bar{e}} = 2\hbar\omega \quad \text{или} \quad E_e + E_{\bar{e}} = 3\hbar\omega,$$

где $E_e, E_{\bar{e}}$ – полная энергия электрона и позитрона соответственно; ω – циклическая частота фотона; m_0 – масса покоя частицы, т. е. масса в системе отсчета, в которой частица покоится.

Кинетическая энергия частицы в общем случае **релятивистская**, т. е. необходимо учитывать увеличение массы при скоростях, близких к скорости света:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m_0v^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}}.$$

При энергии γ -кванта $E_\gamma > 1,02 \text{ МэВ} = 2m_e c^2$ (m_e – масса покоя электрона) становится возможным **обратный процесс образования электронно-позитронных пар** из фотона в электрических полях ядер:

$$\gamma \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_{+1}^0e.$$

Вероятность этого процесса пропорциональна Z^2 ядра и увеличивается с ростом E_γ .

При рассмотрении столкновения частиц полезно использовать инвариантную величину

$$E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4,$$

где E – полная энергия; p – импульс частицы.

При решении задач на столкновение частиц полезно использовать **закон сохранения импульса** в векторной форме, это сильно упрощает решение. На рис. 5.1, а показаны импульс частицы до столкновения и импульсы двух частиц после него. В силу закона сохранения импульса

$$\vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2.$$

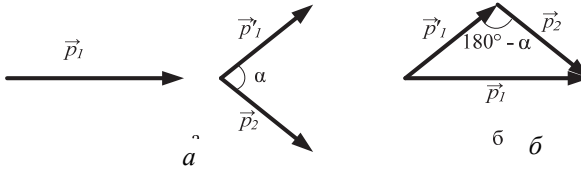


Рис. 5.1

Последняя формула выражается графически (рис. 5.1, б). Из теоремы косинусов

$$p_1^2 = p_1'^2 + p_2'^2 - 2p_1'p_2' \cos(180^\circ - \alpha) = p_1'^2 + p_2'^2 + 2p_1'p_2' \cos \alpha.$$

Такую скалярную форму закона сохранения импульса зачастую проще использовать, чем векторную.

Движущаяся в магнитном поле частица испытывает действие **силы Лоренца**

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}; \vec{B}],$$

где q и v – заряд и скорость частицы; B – индукция магнитного поля. Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости частицы, поэтому ее траектория закручивается и при постоянной скорости, перпендикулярной B , представляет собой окружность или часть окружности.

При скоростях частиц, сравнимых со скоростью света, время процессов для них, с точки зрения неподвижного наблюдателя, замедляется. Поэтому короткоживущие частицы с большими скоростями могут пройти гораздо большее расстояние, чем можно предположить, учитывая время их жизни в неподвижной системе отсчета. **Замедление времени**

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где τ_0 – интервал времени в системе отсчета, в которой частица покоится (собственное время); τ – соответствующий интервал времени в системе отсчета, в которой частица движется.

При взаимных превращениях частиц выполняются **законы сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов**.

Например, протон не может превратиться только в электрон или только в нейтрон. В таких гипотетических процессах не выполняются законы сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов. Однако нейтрон может испустить два лептона – электрон и электронное антинейтрино – и превратиться в протон. При этом суммарный электрический заряд остается равным нулю, суммарный лептонный заряд равен нулю, барионный заряд равен единице. Таким образом, отмеченные законы сохранения выполняются.

Примеры решения задач

Пример 5.1. Определить энергию, выделяющуюся при образовании двух α -частиц в результате синтеза ядер ${}^2\text{H}$ и ${}^6\text{Li}$, если известно, что энергии связи на один нуклон ядер ${}^2\text{H}$, ${}^4\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ равны соответственно 1,11, 7,08 и 5,33 МэВ. Сколько энергии выделится, если при синтезе использовать 1 г дейтерия?

Решение

В исходных и конечных ядрах содержится одинаковое количество протонов и нейтронов (по 4), следовательно, энергия реакции определяется только энергиями связи ядер до и после реакции (естественно, в приведенной ниже формуле их следует брать отрицательными):

$$\begin{aligned} Q &= E_{\text{св}}({}^2\text{H}) + E_{\text{св}}({}^6\text{Li}) - 2E_{\text{св}}({}^4\text{He}) = \\ &= -2 \cdot 1,11 - 6 \cdot 5,33 + 2 \cdot 4 \cdot 7,08 = 22,44 \text{ МэВ.} \end{aligned}$$

Молярная масса атомарного дейтерия 2 г, таким образом, в 1 г содержится $3 \cdot 10^{23}$ ядер, т. е. выделившаяся энергия

$$W = 3 \cdot 10^{23} \cdot 22,44 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \approx 1,08 \cdot 10^{12} \text{ Дж},$$

т. е. равна выработке мощной электростанции (1 ГВт) за 17 мин.

Пример 5.2. Какая энергия необходима, чтобы разделить ядро ^{16}O на четыре одинаковые частицы?

Решение

В каждой из частиц будет два протона и два нейтрона (законы сохранения заряда и барионного числа), т. е. это будут α -частицы. Необходимая для раздела энергия определяется разностью масс исходного ядра и образующихся α -частиц. Учитывая сохранение как числа протонов, так и числа нейтронов, массы ядер можно заменить массами соответствующих атомов (количество электронов атома равно числу протонов и при вычитании массы электронов компенсируется). Воспользовавшись табличными значениями масс изотопов, получим

$$\begin{aligned} Q &= \left({}^1_8m_{\text{O}} - 4 {}^4_2m_{\alpha} \right) c^2 = \\ &= (15,99491 - 4 \cdot 4,00260) \cdot 1,660 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \approx \\ &\approx 2,31 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = 14,5 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Пример 5.3. ^{226}Ra , являясь продуктом распада ^{238}U , содержится в последнем в количестве 1 атом на $2,80 \cdot 10^6$ атомов урана. Найти период полураспада ^{238}U , если известно, что он на несколько порядков больше периода полураспада радия, равного 1620 годам.

Решение

Возьмем в качестве начала отсчета времени $t = 0$ момент в прошлом, отстоящий от времени t_0 измерения, указанного в условии, на много периодов полураспада радия (например, на 50), тем не менее достаточно близкий, чтобы количество нераспавшегося урана фактически не изменилось, т. е. чтобы интервал $(0, t_0)$ был на порядки меньше периода полураспада урана. В этом случае активность урана можно считать постоянной, причем радий, образовавшийся при $t < 0$, к моменту t_0 фактически полностью распался ($2^{-50} < 10^{-5}$). Число нераспавшихся атомов радия можно рассчитать, полагая, что распадающиеся

в каждый интервал времени dt атомы урана производят соответствующее число атомов радия, которые далее распадаются согласно экспоненциальному закону

$$dN_{\text{Ra}} = -dN_{\text{U}} = \lambda_{\text{U}} N_{\text{U}} dt,$$

$$N_{\text{Ra}} = \int_0^{t_0} \lambda_{\text{U}} N_{\text{U}} e^{-\lambda_{\text{Ra}} t} dt = \frac{\lambda_{\text{U}}}{\lambda_{\text{Ra}}} N_{\text{U}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Ra}} t_0}) \cong \frac{\lambda_{\text{U}}}{\lambda_{\text{Ra}}} N_{\text{U}}.$$

Здесь λ – постоянные распада, обратно пропорциональные периодам полураспада; N_{U} – число атомов в момент t_0 (для урана постоянно на всем интервале). Таким образом, заданное в условии отношение концентраций равно

$$\frac{N_{\text{U}}}{N_{\text{Ra}}} = \frac{\lambda_{\text{Ra}}}{\lambda_{\text{U}}} = \frac{(T_{1/2})_{\text{U}}}{(T_{1/2})_{\text{Ra}}} = 2,8 \cdot 10^6.$$

Отсюда период полураспада ^{238}U равен

$$(T_{1/2})_{\text{U}} = 2,8 \cdot 10^6 (T_{1/2})_{\text{Ra}} \approx 4,5 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Пример 5.4. В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего радиоизотоп ^{24}Na (период полураспада 15 ч) активностью $A_0 = 2,0 \cdot 10^3$ Бк. Удельная активность крови, взятой через 5,0 ч после этого, составила $a = 0,27$ Бк·см $^{-3}$. Найти объем крови человека.

Решение

Активность введенного препарата через время t

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

Удельная активность

$$a = \frac{A}{V} = \frac{A_0}{V} e^{-\lambda t} \quad (V - \text{полный объем крови}).$$

Отсюда искомый объем

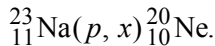
$$V = \frac{A_0}{a} e^{-\lambda t} = \frac{A_0}{a} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) = \frac{2 \cdot 10^3}{0,27} \exp\left(-\frac{0,69}{15} \cdot 5\right) \approx 5900 \text{ см}^3.$$

Пример 5.5. Какие ядра образуются из ^{226}Ra в результате пяти α -распадов и четырех β -распадов?

Решение

Пять α -распадов уменьшают заряд ядра на $2 \cdot 5 = 10$, а массовое число – на $4 \cdot 5 = 20$. Четыре β -распада увеличивают заряд ядра на 4, не изменяя массовое число. Таким образом, в итоге получается ядро с зарядом 82 и массовым числом 206, т. е. ^{206}Pb .

Пример 5.6. Определить неизвестный продукт x реакции



Решение

Закон сохранения заряда для неизвестного заряда ядра Z дает уравнение

$$11 + 1 = Z + 10,$$

отсюда $Z = 2$. Соответственно, для массовых чисел получаем

$$23 + 1 = A + 20,$$

т. е. $A = 4$. Частица с полученными параметрами – α -частица.

Пример 5.7. Электрон и позитрон, образованные фотоном с энергией $h\nu = 5,7$ МэВ, вычерчивают в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, траектории с радиусом кривизны 3 см. Найти магнитную индукцию B поля.

Решение

Надвигающуюся перпендикулярно линиям индукции магнитного поля заряженную частицу действует сила Лоренца qvB (q – заряд частицы, v – ее скорость, B – индукция магнитного поля). Эта сила сообщает частице нормальное ускорение. В результате частица движется по окружности.

Исходя из второго закона Ньютона

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

находим индукцию

$$B = \frac{mv}{rq} = \frac{p}{rq}.$$

Электрон-позитронная пара образуется фотоном, при этом обе частицы будут иметь скорость, сравнимую со скоростью света, т. е. частицы релятивистские (большая часть энергии фотона перейдет в кинетическую энергию пары). Релятивистский импульс p определяется через кинетическую энергию частицы W :

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{W(W + 2m_0c^2)}.$$

Согласно закону сохранения энергия фотона равна сумме энергий покоя электрона и позитрона плюс их кинетическая энергия, которую для обеих частиц считаем одинаковой:

$$h\nu = 2m_0c^2 + 2W.$$

Отсюда находим энергию одной частицы

$$W = \frac{h\nu - 2m_0c^2}{2} = \frac{5,7 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} - 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{2} = 3,74 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Значение индукции находим, подставив выражение для импульса электрона (или позитрона) в формулу для B :

$$B = \frac{1}{cqr} \sqrt{W(W + 2m_0c^2)} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,03} \times \sqrt{3,74 \cdot 10^{-13} (3,74 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16})} = 0,31 \text{ Тл.}$$

Пример 5.8. Нейтрон с кинетической энергией 20 МэВ налетает на неподвижный антинейтрон. В результате аннигиляции образуется два одинаковых гамма-кванта. Найти максимальный угол разлета квантов.

Решение

Антинейтрон неподвижен, поэтому сохраняется исходный импульс нейтрона. Так как кванты одинаковые, то их импульсы также будут одинаковыми по величине, а направления образуют одинаковые углы с направлением импульса нейтрона (суммарный импульс должен иметь то же направление).

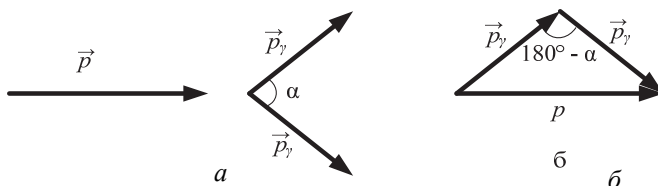


Рис. 5.2

Из закона сохранения импульса (см. рис. 5.2, а)

$$\vec{p} = \vec{p}_\gamma + \vec{p}_\gamma.$$

Эту формулу удобнее представить графически в виде треугольника, как изображено на рис. 5.2, б. Применяя теорему косинусов, получим

$$p^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma^2 - 2p_\gamma p_\gamma \cos(180^\circ - \alpha).$$

Учитывая, что импульсы фотонов равны по модулю и применяя формулу приведения, получим

$$p^2 = 2p_\gamma^2 - 2p_\gamma^2 \cos(180^\circ - \alpha) = 2p_\gamma^2 (1 + \cos \alpha).$$

Отсюда выражаем угол α разлета фотонов:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{p^2}{2p_\gamma^2} - 1 \right).$$

Импульс фотона $p_\gamma = \frac{W_\Phi}{c}$. Импульс релятивистского нейтрона выражается через его кинетическую энергию

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{W_k (W_k + 2m_0c^2)}.$$

Из закона сохранения энергии найдем энергию каждого фотона, учитывая, что массы нейтрона и антинейтрона одинаковые:

$$2W_\Phi = 2m_0c^2 + W_k,$$

$$W_\Phi = \frac{W_k + 2m_0c^2}{2}.$$

Подставим значения величин и произведем расчеты, учитывая, что $20 \text{ МэВ} = 20 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 32 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$:

$$p = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \sqrt{32 \cdot 10^{-13} (32 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 1,675 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16})} =$$

$$= 104 \cdot 10^{-21} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с};$$

$$W_\Phi = \frac{32 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 1,675 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{2} = 1,52 \cdot 10^{-10} \text{ Дж};$$

$$p_\gamma = \frac{1,52 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 10^8} = 507 \cdot 10^{-21} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с};$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{(104 \cdot 10^{-21})^2}{2(507 \cdot 10^{-21})^2} - 1\right) = 168^\circ.$$

Занятие 21. Ядро. Радиоактивность.

21.1. Образец содержит 1000 радиоактивных атомов с периодом полураспада T . Сколько атомов останется через промежуток времени $T/2$?

21.2. Определить период полураспада висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$, если известно, что висмут массой 1 г выбрасывает $4,58 \cdot 10^{15}$ β -частиц за 1 с.

21.3. Сколько α -частиц выбрасывает торий $^{232}_{90}\text{Th}$ массой 1 г за 1 с? Период полураспада тория $1,39 \cdot 10^{11}$ лет.

21.4. Какое ядро образуется из α -активного $^{226}_{88}\text{Ra}$ в результате четырех α -распадов и четырех β -распадов?

21.5. Радий массой 1 г за 1 с испускает $3,7 \cdot 10^{10}$ α -частиц, обладающих скоростью 15 Мм/с. Найти полную энергию, выделяющуюся при α -распаде за 1 ч.

21.6. Активность некоторого радиоизотопа уменьшается в 2,5 раза за 7 сут. Найти его период полураспада.

21.7. Вычислить энергию связи и энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра бора $^{11}_5\text{B}$.

21.8. Вычислить энергию, необходимую для разделения ядра ^{20}Ne на две α -частицы и ядро ^{12}C , если энергии связи на один нуклон в ядрах ^{20}Ne , ^4He и ^{12}C равны 8,03, 7,07 и 7,68 МэВ соответственно.

21.9. Считая, что в одном акте деления ядра урана ^{235}U освобождается энергия 200 МэВ, определить:

а) энергию, выделяющуюся при сгорании одного килограмма ^{235}U , и массу каменного угля с теплотворной способностью 30 кДж/г, эквивалентную в тепловом отношении одному килограмму ^{235}U ;

б) массу изотопа ^{235}U , подвергшегося делению при взрыве атомной бомбы с тротиловым эквивалентом 30 килотонн, если тепловой эквивалент тротила равен 4,1 кДж/г.

21.10. Вычислить энергию связи ядер ^3H и ^3He . Какое из этих ядер более устойчиво?

21.11. В обычном природном калии содержится 0,0117 % радиоактивного изотопа ^{40}K с периодом полураспада $1,248 \cdot 10^9$ лет. Определить естественную активность препарата природного калия массой 1 г.

Задачи для самостоятельного решения

Д21.1. Определить энергию, которая выделится при образовании трития (изотопа атома водорода) из одного протона и двух нейтронов.

Д21.2. За какое время произойдет распад полония ${}_{84}^{240}\text{Po}$ массой 2 мг, если в начальный момент его масса 0,2 г? Период полураспада полония 138 сут.

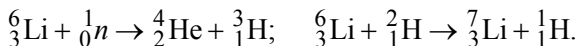
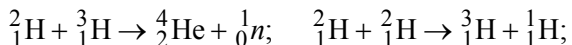
Д21.3. Радиоактивный элемент нептуний ${}_{93}^{241}\text{Np}$, являющийся родоначальником искусственно полученного радиоактивного семейства нептуния, в результате распада превращается в стабильный изотоп висмута ${}_{83}^{209}\text{Bi}$. Найти число α - и β -распадов в этом процессе.

Д21.4. Сравнить энергию связи, приходящуюся в среднем на один нуклон, в ядрах дейтерия ${}^2\text{H}$, железа ${}^{56}\text{Fe}$, ксенона ${}^{131}\text{Xe}$.

Занятие 22. Ядерные реакции. Элементарные частицы

22.1. Ядро бериллия ${}^9\text{Be}$, захватывая дейтрон, превращается в ядро бора ${}^{10}\text{B}$. Написать уравнение реакции и определить выделяющуюся энергию.

22.2. Найти энергию, выделяющуюся при следующих термоядерных реакциях:



22.3. При облучении α -частицами алюминия ${}^{27}\text{Al}$ испускается нейтрон и образуется изотоп фосфора ${}^{30}\text{P}$. Образовавшийся изотоп фосфора является радиоактивным и распадается с испусканием позитронов. Написать эту реакцию и определить выделяющуюся в ней энергию.

22.4. Написать недостающее обозначение в реакции ${}^{23}\text{Na}(p, X){}^{20}\text{Ne}$.

22.5. Вычислить энергию на один нуклон, которая выделяется при протекании реакции ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$. Сравнить полученную величину с энергией на один нуклон, освобождающейся при делении ядра ${}^{235}\text{U}$.

22.6. Найти скорости продуктов реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, протекающей в результате взаимодействия очень медленных нейтронов с покоящимися ядрами бора.

22.7. Написать уравнение кварковой реакции (рис. 5.3).

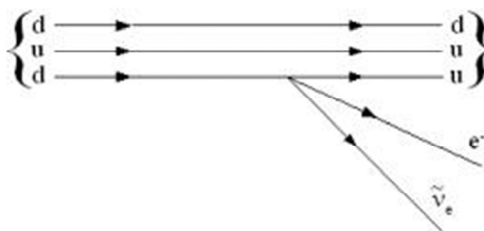


Рис. 5.3

22.8. Электрон с кинетической энергией 0,5 МэВ налетает на неподвижный позитрон. Процесс аннигиляции происходит по схеме: $e^- + e^+ = 2\gamma$. В результате аннигиляции возникает два γ -фотона с одинаковыми энергиями. Определить угол между направлениями их разлета.

Задачи для самостоятельного решения

Д22.1. Определить порядковый номер Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой x , в символической записи ядерной реакции: $^{14}_6\text{C} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + x$.

Д22.2. Определить порядковый номер Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой x , в символической записи ядерной реакции: $^{27}_{13}\text{Al} + x \rightarrow ^1_1\text{H} + ^{26}_{12}\text{Mg}$.

Д22.3. При ядерной реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ освобождается энергия $Q = 5,70$ МэВ. Пренебрегая кинетическими энергиями ядер бериллия и гелия и принимая их суммарный импульс равным нулю, определить кинетические энергии T_1 и T_2 продуктов реакции.

Д22.4. Покоившееся ядро полония $^{210}_{84}\text{Po}$ выбросило α -частицу с кинетической энергией $T = 5,3$ МэВ. Определить кинетическую энергию T ядра отдачи и полную энергию E , выделившуюся при α -распаде.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Приставки для образования кратных и дольных единиц СИ

Приставка	Обозначение	Множитель	Пример
фемто	ф	10^{-15}	фм, фс
пико	п	10^{-12}	пм, пФ
нано	н	10^{-9}	нм, нКл
микро	мк	10^{-6}	мкм, мкФ
милли	м	10^{-3}	мм, мН
санτι	с	10^{-2}	см
деци	д	10^{-1}	дм
–	–	1	м
дека	да	10^1	дам, дал
гекто	г	10^2	гм, га
кило	к	10^3	км, кВ
мега	М	10^6	Мм, МПа
гига	Г	10^9	Гм, ГПа
тера	Т	10^{12}	Тм, ТГц

Некоторые трансцендентные числа и приближенные формулы

Числа	Приближенные формулы ($x \ll 1$)
$\pi \approx 3,1416$	$(1 \pm x)^k \approx 1 \pm kx$
$\pi^2 \approx 9,8696$	$e^{\pm x} \approx 1 \pm x$
$\sqrt{\pi} \approx 1,7725$	$\ln(1 \pm x) \approx \pm x$
$e \approx 2,7183$	$\sin x \approx \operatorname{tg} x \approx x$
$\lg e \approx 0,4343$	$\cos x \approx 1 - x^2/2$
$\ln 2 \approx 0,69$	–
$\ln 10 \approx 2,3026$	–

Некоторые физические постоянные

Скорость света в вакууме (точно)	$c = 299792458 \text{ м/с}$
Ускорение свободного падения (в Новосибирске)	$g = 9,8145 \text{ м/с}^2$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,854188 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Заряд электрона	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Число Авогадро (точно)	$N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Стефана–Больцмана	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная закона смещения Вина	$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка (с чертой)	$\hbar = 1,0545887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Ридберга	$R = 3,2898 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Диэлектрические проницаемости ε некоторых веществ

Вещество	ε	Вещество	ε
Парафин	2,3	Слюда	4...8
Полихлорвинил	3,3	Береза сухая	3...4
Стекло	4...10	Канифоль	3,5
Резина	2,6...3	Керосин	2
Эбонит	4...4,5	Глицерин	56
Ацетон	21	Вода (при 0 °С)	81

Удельное сопротивление ρ и температурный коэффициент сопротивления α некоторых веществ

Вещество	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Алюминий	2,7	4,3
Медь	1,72	3,8
Золото	2,2	3,9
Серебро	1,6	3,8
Вольфрам	55	4,1
Железо	10	6,2
Графит	800	–
Ртуть	96	0,92
Константан (58,8 % Cu, 40 % Ni, 1,2 % Mn)	50	0,03
Нихром (67,5 % Ni, 15 % Cr, 16 % Fe, 1,2 % Mn)	112	0,25

Магнитная проницаемость μ некоторых веществ

Вещество	μ	Вещество	μ
Пермаллой	50000	Платина	1,00026
Полосовое железо	5000	Алюминий	1,000021
Чугун	600	Медь	0,9999904
Сталь	200	Стекло	0,999987

Шкала электромагнитных волн

Длина волны, м	Название диапазона
$10^6 \dots 10^4$	Сверхдлинные
$10^4 \dots 1$	Радиоволны
$1 \dots 10^{-4}$	Волны сверхвысокой частоты (СВЧ)
$10^{-4} \dots 7,6 \cdot 10^{-7}$	Инфракрасные волны (ИК)
$7,6 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-7}$	Видимый свет
$4 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-9}$	Ультрафиолетовое излучение (УФ)
$10^{-9} \dots 10^{-12}$	Рентгеновское излучение
$10^{-12} \dots 10^{-14}$	γ -излучение

Интервалы длин волн, соответствующие различным участкам видимого спектра

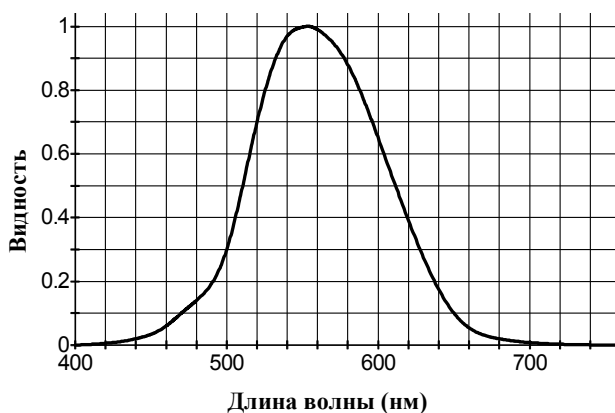
Цвет	Интервал длин волн, нм	Цвет	Интервал длин волн, нм
Фиолетовый	400...440	Желтый	565...590
Синий	440...485	Оранжевый	590...625
Голубой	485...500	Красный	625...760
Зеленый	500...565		

Примечание: соответствие интервалов длин волн цветам достаточно условно, как и сами цвета.

Показатели преломления (средние для видимых лучей)

Алмаз	2,42	Лед (-4 °С)	1,31
Вода (20 °С)	1,33	Спирт (20 °С)	1,47
Этиловый спирт	1,36	Оргстекло	1,49
Глицерин	1,45	Кварц	1,54
Бензол	1,50	Стекло	1,5...1,9

Кривая чувствительности человеческого глаза



Периодическая система химических элементов

Периоды	Ряды	I группа	II группа	III группа	IV группа
1	1	(H)			
2	2	3 Li 6,939 литий	4 Be 9,0122 бериллий	5 10,81 B бор	6 12,01115 C углерод
3	3	11 Na 22,98 натрий	12 Mg 24,305 магний	13 26,9814 Al алюминий	14 28,086 Si кремний
4	4	19 K 39,102 калий	20 Ca 40,08 кальций	21 Sc 44,956 скандий	22 Ti 47,90 титан
	5	29 63,54 Cu медь	30 65,37 Zn цинк	31 69,72 Ga галлий	32 72,59 Ge германий
5	6	37 Rb 85,467 рубидий	38 Sr 87,62 стронций	39 Y 88,905 иттрий	40 Zr 91,22 цирконий
	7	47 107,87 Ag серебро	48 112,40 Cd кадмий	49 114,82 In индий	50 118,69 Sn олово
6	8	55 Cs 132,905 цезий	56 Ba 137,34 барий	57 La 138,91 лантан	72 Hf 178,49 гафний
	9	79 196,967 Au золото	80 200,59 Hg ртуть	81 204,37 Tl галлий	82 207,19 Pb свинец
7	10	87 Fr <223> франций	88 Ra <226> радий	89 Ac <227> актиний	104 Rf <260> резерфордий

Лантаноиды

57 La 138,91 лантан	58 Ce 140,12 церий	59 Pr 140,907 празеодим	60 Nd 144,24 неодим	61 Pm <145> прометий	62 Sm 150,35 самарий	63 Eu 151,96 европий	64 Gd 157,25 гадолиний
----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

Актиноиды

89 Ac <227> актиний	90 Th 232,04 торий	91 Pa <231> протактиний	92 U 238,03 уран	93 Np <237> нептуний	94 Pu <242> плутоний	95 Am <243> америций	96 Cm <243> кюрий
----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------

V группа	VI группа	VII группа	VIII группа		
		1 H 1,0079 водород	2 4,0026 He гелий		
7 14,0067 N азот	8 15,9994 O кислород	9 18,998 F фтор	10 20,183 Ne неон		
15 30,97376 P фосфор	16 32,064 S сера	17 35,453 Cl хлор	18 39,948 Ar аргон		
23 V 50,942 ванадий	24 Cr 51,996 хром	25 Mn 54,9380 марганец	26 Fe 55,847 железо	27 Co 58,9332 кобальт	28 Ni 58,71 никель
33 74,9216 As мышьяк	34 78,96 Se селен	35 79,909 Br бром	36 83,80 Kr криптон		
41 Nb 92,906 ниобий	42 Mo 95,94 молибден	43 Tc 98,9062 технеций	44 Ru 101,07 рутений	45 Rh 102,905 родий	46 Pd 106,4 палладий
51 121,75 Sb сурьма	52 127,60 Te теллур	53 126,9044 I йод	54 131,30 Xe ксенон		
73 Ta 180,948 тантал	74 W 183,85 вольфрам	75 Re 186,2 рений	76 Os 190,2 осмий	77 Ir 192,2 иридий	78 Pt 195,2 платина
83 208,980 Bi висмут	84 <210> Po полоний	85 <210> At астат	86 <222> Rn радон		
105 Db <261> дубний	106 Sg <263> сиборгий	107 Bh <264> борий	108 Hs <269> хассий	109 Mt <268> мейтнерий	

Лантаноиды

65 Tb 158,924 тербий	66 Dy 162,50 диспрозий	67 Ho 164,93 гольмий	68 Er 167,26 эрбий	69 Tm 168,934 тулий	70 Yb 173,04 иттербий	71 Lu 174,97 лютеций
-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

Актиноиды

97 Bk <249> берклий	98 Cf <249> калифорний	99 Es <254> эйнштейний	100 Fm <255> фермий	101 Md <256> менделевий	102 No <254> нобелий	103 Lr <257> лоуренсий
----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

Работа выхода электрона из металла (эВ)

Вольфрам	4,5	Никель	5,0
Железо	4,74	Платина	5,29
Золото	4,68	Ртуть	4,52
Калий	2,0	Рубидий	2,13
Литий	2,4	Серебро	4,74
Магний	3,46	Тантал	4,07
Медь	4,47	Цезий	1,97
Молибден	4,2	Цинк	4,0
Натрий	2,3		

Температура Дебая

Вещество	θ_d , К	Вещество	θ_d , К
Алюминий	374	Свинец	89
Железо	467	Серебро	210
Медь	329	Германий	370
Глаубева соль KCl	230	Никель	450
Поваренная соль NaCl	280	Флюорит CaF ₂	474

Ширина запрещенной зоны ΔE в некоторых полупроводниках

Вещество	ΔE , эВ	Вещество	ΔE , эВ
Ge	0,72	GaAs	1,42
Si	1,12	CdS	2,42
InSb	0,17	CdSe	1,70
PbS	0,41		

Период полураспада некоторых изотопов

Висмут $^{210}_{83}\text{Bi}$	5,02 сут	Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 сут
Иридий $^{192}_{77}\text{Ir}$	75 сут	Стронций $^{90}_{38}\text{Sr}$	28 лет
Кальций $^{45}_{20}\text{Ca}$	164 сут	Торий $^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ лет
Натрий $^{24}_{11}\text{Na}$	15,3 ч	Уран $^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ лет
Полоний $^{210}_{84}\text{Po}$	138 сут	Уран $^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Радий $^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 лет		

Массы некоторых изотопов* (а.е.м.)

Изотоп	Масса	Изотоп	Масса
${}^1_1\text{H}$	1,00783	${}^{17}_8\text{O}$	16,99913
${}^2_1\text{D}$ (${}^2_1\text{H}$)	2,01410	${}^{19}_9\text{F}$	18,99840
${}^3_1\text{T}$ (${}^3_1\text{H}$)	3,01605	${}^{20}_{11}\text{Na}$	19,99244
${}^3_2\text{He}$	3,01603	${}^{23}_{11}\text{Na}$	22,98977
${}^4_2\text{He}$	4,00260	${}^{24}_{11}\text{Na}$	23,99097
${}^6_3\text{Li}$	6,01512	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98154
${}^7_3\text{Li}$	7,01600	${}^{28}_{13}\text{Al}$	27,9769
${}^7_4\text{Be}$	7,01693	${}^{28}_{14}\text{Si}$	27,9769
${}^8_4\text{Be}$	8,00531	${}^{30}_{14}\text{Si}$	29,97377
${}^9_4\text{Be}$	9,01218	${}^{31}_{15}\text{P}$	30,97376
${}^{10}_4\text{Be}$	10,01294	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	55,9349
${}^{10}_5\text{B}$	10,01294	${}^{59}_{27}\text{Co}$	58,93320
${}^{11}_5\text{B}$	11,00930	${}^{60}_{29}\text{Ni}$	59,9308
${}^{12}_6\text{C}$	12,0	${}^{131}_{54}\text{Xe}$	130,9051
${}^{13}_7\text{N}$	13,00574	${}^{230}_{90}\text{Th}$	230,0331
${}^{14}_7\text{N}$	14,00307	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,0493
${}^{16}_8\text{O}$	15,99491	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,05353

* Приведены массы атомов вместе с электронами. Масса нейтрона 1,00866 а.е.

Характеристики элементарных частиц

Частица		Символ*	Масса (m_e)	Время жизни (с)	Спин	Заряды**		
						Q	L	B
Фотон		γ	0	∞	1	0	0	0
Лептоны	Нейтрино	$\nu \quad \bar{\nu}$	0	∞	1/2	0	+1	0
	Электрон	$e^- \quad e^+$	1	∞	1/2	-1	+1	0
	Мюон	$\mu^- \quad \mu^+$	206,77	$2,2 \cdot 10^{-6}$	1/2	-1	+1	0
	Тау-лептон	$\tau^- \quad \tau^+$	3490	$3,5 \cdot 10^{-12}$	1/2	-1	+1	0
Мезоны	Пи-мезоны	$\pi^- \quad \pi^+$	273,2	$2,55 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0
		π^0	264,2	$2 \cdot 10^{-16}$	0	0	0	0
	Ка-мезоны	$K^- \quad K^+$	966,3	$1,23 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0
		$K^0 \quad \bar{K}^0$	974,5	$10^{-10} - 10^{-8}$	0	0	0	0
Эта-мезон	η	1074	$2,4 \cdot 10^{-19}$	0	0	0	0	
Фи-мезон	ϕ	1995	10^{-19}	1	0	0	0	
Барионы	Протон	$p \quad \bar{p}$	1836,1	∞	1/2	+1	0	+1
	Нейтрон	$n \quad \bar{n}$	1838,6	10^3	1/2	0	0	+1
	Лямбда-гиперон	$\Lambda^0 \quad \bar{\Lambda}^0$	2182,8	$2,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	0	+1
	Сигма-гиперон	$\Sigma^+ \quad \bar{\Sigma}^-$	2328	$0,8 \cdot 10^{-10}$	1/2	+1	0	+1
		$\Sigma^- \quad \bar{\Sigma}^+$	2342	$1,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1
		$\Sigma^0 \quad \bar{\Sigma}^0$	2333	10^{-14}	1/2	0	0	+1
Кси-гиперон	$\Xi^- \quad \bar{\Xi}^+$	2585	$1,7 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1	
	$\Xi^0 \quad \bar{\Xi}^0$	2572	$3 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	0	+1	
Омега-гиперон	$\Omega^- \quad \bar{\Omega}^+$	3278	10^{-10}	3/2	-1	0	+1	

* Справа указаны символы соответствующих античастиц, для которых Q , L , B имеют противоположный знак.

** Q – электрический заряд; L – лептонный заряд; B – барионный заряд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чертов А. Г.* Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – Москва : Физматлит, 2009. – 640 с.
2. Сборник задач по курсу общей физики: учебное пособие для студентов пед. ин-тов / Г. А. Загуста и др.; под ред. М. С. Цедрика. – Москва : Просвещение, 1989. – 271 с.
3. *Савельев И. В.* Сборник вопросов и задач по общей физике: учебное пособие / И. В. Савельев. – Москва : АСТ-Пресс, 2005. – 318 с.
4. *Овчинников Ю. Э.* Задачи для самостоятельного решения по курсу общей физики (раздел «Квантовая и атомная физика»): учебное пособие / Ю. Э. Овчинников, С. А. Погожих. – Новосибирск: Изд-во НГПУ, 2011. – 104 с.
5. *Погожих С. А.* Задачи по разделу «Оптика» курса общей физики: учебное пособие / С. А. Погожих. – Новосибирск: Изд-во НГПУ, 2008. – 36 с.

ОТВЕТЫ

1.2. 0,25 Н·м; **1.3.** 15 мкТл; **1.4.** 12,3 А; **1.5.** 3,5 А; **1.6.** 2,4 мТл, 4,8 мТл; **1.7.** 0,63 А, 34 А·м²; **1.8.** 1 А; **1.9.** 0,08 А; **1.10.** 16 мТл; **Д1.1.** 16 мТ; **Д1.2.** 21,5 А; **Д1.3.** 50 мкТл; **Д1.4.** 40 мкТл; **2.1.** 0,2 Тл; **2.2.** 5,3 мкН; **2.3.** 1 Н; **2.4.** 760 мкТл; **2.5.** 2,3 мм, 20 мм; **2.6.** 0,65 м; **2.7.** 1000 км/с; **Д2.1.** 1 кН/м; **Д2.2.** 0,1 Н; **Д2.3.** 0,125 Н/м; **Д2.4.** $2,4 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с; **Д2.5.** 14,5 см; **3.1.** $25 \cdot 10^{-7}$ Тл·м, $126 \cdot 10^{-7}$ Тл·м; **3.2.** 0,45 мН; **3.3.** 0,68 мкВ; **3.4.** 0,77 Тл, 1200; **3.5.** увеличить 1,8 раза; **3.6.** 0,48 Гн; **Д3.1.** 78,6 А; **Д3.2.** 20 мТл, 10 мТл; **Д3.3.** 1,29 Тл, 1030; **Д3.4.** 15; **4.2.** 0,48 мВ; **4.3.** 62,8 В; **4.6.** 1,57 мГн, 25 см, 2000 м⁻¹; **4.7.** 0,18 Тл; **Д4.1.** 20 В; **Д4.2.** 1 Н; **Д4.3.** 201 мВ; **Д4.4.** 8 см⁻¹; **5.1.** 3 мДж; **5.2.** 6,84 мДж; **5.3.** 50 мДж; **5.4.** 0,15 Дж; **5.5.** 2000; **5.6.** Увеличилась в 10,5 раза; **5.7.** 1,1 кДж/м³; **5.8.** 161 Дж/м³; **5.9.** Уменьшится в 5,8 раза; **Д5.1.** 80 мкДж; **Д5.2.** 10 Дж; **Д5.3.** 25 Дж/м³; **Д5.4.** 1,26 А; **6.1.** $\pm 0,77$ м/с²; **6.2.** $\pm 0,13$ м/с², 5 мН, 1,23 мДж; **6.4.** 200 пФ; **6.5.** 12,5 мА, 3,82 мкКл; **6.6.** 1,54 с; **Д6.2.** 8,33 см; **Д6.3.** 0,8 Дж; **Д6.4.** 25 см, 1 с; **Д6.5.** 1 А; **7.1.** 4,05 см, -0,26 рад; **7.2.** 0,01 с⁻¹, 0,01, 314; **7.3.** 0,0031 с, 0,062; **7.4.** 0,73, 24,14 с⁻¹; **7.5.** 0,503 мс, 0,1, 31,2, 100 Ом; **7.6.** 54,6 мГн, 0,0088 с; **7.7.** 1002 Гц; **7.8.** 510 Гц; **Д7.1.** 231; **Д7.2.** $9,16 \cdot 10^{-5}$ кг/с; **Д7.3.** 4,05 Гц; **Д7.4.** 1,75 с⁻¹; **8.1.** 6,28 мВ, 0,63 А; **8.2.** 0,4 А, 0,2 А; **8.3.** 1,36 А, 19,6 Вт; **8.4.** 71,1 Гц, 67,6 Гц; **8.5.** 0,82 А, 96 Вт, 13,3°; **8.6.** 10 В, 1 В, 1 В; **Д8.1.** 32 мкФ; **Д8.2.** 1,17 А, 50 Гц, 110 А, 5500 В, 5500 В, 220 В; **Д8.3.** 27,7 Ом; **Д8.4.** 2,7 кГц; **9.2.** 2 мм; **9.3.** 1,26 рад; **9.4.** 5,05 км/с, 2,31 км/с, 4,44 км/с; **9.5.** 1,67; **9.6.** уменьшится в 1,53 раза; **9.7.** 0,251 Дж/м³; **9.8.** 3 мкм; **9.9.** увеличится в 1,54 раза; **9.10.** 341 Гц, 268 Гц; **Д9.1.** 350 м/с, 0,79 м/с; **Д9.2.** 1,57 рад; **Д9.3.** 21 м, 17 мм; **Д9.4.** 3,01 мДж/м³; **10.1.** 0,75 В/м; **10.2.** 1,5 ГГц, 4,7 мВт; **10.4.** $2,3 \cdot 10^8$ м/с; **10.5.** 40 м; **10.6.** 1030 В/м; **10.8.** 450 ТГц, 390 В/м, 1,6 А/м, 320 Вт/м²; **10.9.** ; **Д10.1.** 1,3 мкДж;

Д10.2. 1,1; **Д10.3.** 1,4; **Д10.4.** 26; **12.1.** 0,9 мкм, 67 мкм; **12.2.** 15 мм; **12.4.** 517 нм, зеленый; **12.5.** 140 нм; **12.6.** 1,3; **12.7.** 1,5 мкм; **Д12.1.** 4 мм; **Д12.2.** 2 м; **Д12.3.** 0,1 мкм; **Д12.4.** 0,15 мкм; **13.1.** ; **13.2.** 4 мм; **13.3.** 30°; **13.5.** 5; **13.6.** 983; **13.7.** 1 мм, 0,096°; **Д13.1.** 8 зон; **Д13.2.** 2°45'; **Д13.3.** 103; **Д13.4.** 1000 мм⁻¹; **14.1.** 56°; **14.2.** 45°; **14.3.** В 12 раз; **14.4.** 1; **14.5.** 0,048; **14.6.** 250 кг/м³; **14.7.** 2 мм; **Д14.1.** 37°; **Д14.2.** В 2 раза; **Д14.3.** В 1,23 раза; **Д14.4.** 0,21 г/см³; **15.1.** 3,8 ГДж; **15.2.** 52 Вт; **15.3.** 9,2 МДж; **15.4.** 3,3, 565 К; **15.5.** 1,81; **15.6.** 1,07 мкм, 0,9 мкм; **15.7.** 8 мин; **15.8.** 380 К; **15.9.** 1260 Вт/м²; **Д15.1.** 648 К; **Д15.2.** 5,65 кДж; **Д15.3.** 4980 К; **Д15.4.** Увеличилась в 81 и 243 раза; **16.1.** 60; **16.2.** 3,5·10¹⁵; **16.3.** 830 км/с; **16.4.** 10,85 эВ; **16.6.** 93 мН, 93 мкм/с²; **16.7.** 41 пм, 10⁸ м/с; **16.8.** 2,41 пм, 48·10⁻⁶, 0,48; **16.9.** 0,43 МэВ, 0,32 МэВ, 3,5·10⁻²² кг·м/с; **Д16.1.** 4 эВ; **Д16.2.** 0,1 нН; **Д16.3.** 3,27 эВ, 5,8·10⁻³⁶, 1,74·10⁻²⁷ кг·м/с; **Д16.4.** 120° или 240°; **17.1.** 160 пм; **17.2.** 200 км/с; **17.3.** 1,4 мм; **17.4.** 2,8 мм; **17.5.** 600 нм; **17.6.** 1 эВ; **17.7.** 10⁻⁷, 10⁻⁵ нм; **17.8.** 1,24 нм; **Д17.1.** 2,7 пм; **Д17.2.** 150 В; **Д17.3.** 10⁻⁴; **Д17.4.** 0, 0,1 мкэВ; **18.1.** 0,375 эВ, 1,125 эВ, 201; **18.2.** 0,61; **18.3.** 81·10⁶ эВ⁻¹; **18.4.** 6·10⁻⁷; **18.5.** 0,067, 0,07 нм; **18.6.** 74; **Д18.1.** 4,48 эВ; **Д18.2.** Максимальна при 3/4, минимальна при 1/2; **Д18.3.** 0,475; **Д18.** Уменьшится в 79 раз; **19.1.** 9; **19.2.** 13,6 эВ, 91 нм; **19.3.** 3,4 эВ; **19.4.** 3·10⁶ м/с; **Д19.1.** Два s-электрона, два s-электрона и шесть p-электронов; **Д19.2.** 1, 2, 2(2l+1), 2 n²; **Д19.3.** 4,3 нм; **Д19.4.** 10,2 эВ; **20.1.** 8 мм/с; **20.4.** 2,4; **20.5.** 4,6·10²⁷; **20.6.** 6,8 эВ; **20.7.** 16 МОм; **20.8.** 2,39; **Д20.1.** 0,9; **Д20.2.** 1,32 Мм/с; **Д20.3.** 2,28; **Д20.4.** 2·10²², 0,035 м²/В·с; **21.1.** 707; **21.2.** 5 сут; **21.3.** 4100 Бк; **21.5.** 100 Дж; **21.6.** 5,31 сут; **21.7.** 77 МэВ, 7 МэВ; **21.8.** 11 МэВ; **21.9.** а) 8,2·10¹³ Дж, 2700 т, б) 1,5 кг; **21.10.** 8,6 МэВ, 7,8 МэВ; **21.11.** 32 Бк; **Д21.1.** 8,49 МэВ; **Д21.2.** 2 сут; **Д21.3.** 8 α- и 6 β-распадов; **Д21.4.** 1,12 МэВ, 8,86 МэВ, 8,49 МэВ; **22.1.** 4,4 МэВ; **22.2.** 17,7 МэВ, 4,06 МэВ, 4,8 МэВ, 5,06 МэВ; **22.3.** 1,61 МэВ; **22.5.** 2,8 МэВ; **22.6.** 6600 км/с, 3800 км/с; **22.8.** 109°; **Д22.1.** 0, 1; **Д22.2.** 0, 0; **Д22.3.** 5,26 МэВ, 0,44 МэВ; **Д22.4.** 0,104 МэВ, 5,4 МэВ.

**Погожих Сергей Анатольевич
Стрельцов Сергей Анатольевич**

**ФИЗИКА
СБОРНИК ЗАДАЧ**

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ,
ОПТИКА, КВАНТОВАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

Учебное пособие

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кишин*
Художественный редактор *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 12.05.2020. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 200 экз. Уч.-изд. л. 6,97. Печ. л. 7,5. Изд. № 52. Заказ № 589
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20